



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Diseño, fabricación y validación de modelos por impresión 3D para su uso en procesos de fundición.

Autor:

REOYO BENITO, MARCOS

Tutores:

Santos Martín, Francisco Javier
Merino Gómez, Elena
Departamento de
CMeIM/EGI/ICGF/EM/IPF
Área de Ingeniería de los Procesos de
Fabricación

Valladolid, junio de 2023.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



AGRADECIMIENTOS

Quería agradecer en primera instancia a mis padres, por animarme a comenzar esta etapa y ofrecerme todo su apoyo y muchos consejos que me han ayudado a conseguirlo.

A mi novia, por compartir esta dura etapa conmigo, siendo el hombro en el que apoyarme cuando aparecían momentos difíciles.

A todos mis compañeros, por hacer que diera más de mí mismo durante todos estos años.

A Francisco, Elena y Julián. Muchas gracias por el tiempo invertido y por las recomendaciones realizadas a la hora de finalizar el trabajo.



RESUMEN

Este trabajo de fin de grado tiene como contenido el diseño e impresión de piezas en 3D para su uso posterior en dos procesos distintos de fundición, la fundición por colada directa en molde de arena y la fundición a la cera perdida. Para estos modelos se utilizarán tanto materiales corrientes de uso en impresión 3D como materiales de impresión fabricados exclusivamente para ciertos procesos de fundición.

En total se realizarán tres procesos de fundición con diferencias entre sí. El primer proceso se realizará por colada directa en molde de arena, utilizando como material poliestireno de alto impacto. En los dos siguientes procesos de fundición se utilizará la fundición a la cera perdida. La variación entre estos procesos se encuentra en el material utilizado, ya que se utilizarán dos materiales distintos diseñados específicamente para este proceso, llamados MoldLay y Polycast. Además, tras la impresión en 3D y las fundiciones de los distintos materiales, se controlarán las dimensiones obtenidas en los modelos para estudiar la viabilidad de la sustitución de los modelos convencionales por modelos en 3D, identificando los problemas y discrepancias que aparezcan en cada proceso en función del resultado ideal que se pretende obtener.

Palabras clave: Impresión 3D, modelo, cera perdida, filamento, fundición.

ABSTRACT

The content of this final degree project is the design and printing of 3D parts for subsequent use in two different casting processes, direct casting in sand moulds and lost wax casting. For these models, both materials commonly used in 3D printing and printing materials manufactured exclusively for certain casting processes will be used.

A total of three different casting processes will be used. The first process will be carried out by direct casting in a sand mould, using high-impact polystyrene as the material. In the next two casting processes, lost-wax casting will be used. The variation between the processes is in the material used, as two different materials specifically designed for this process, called MoldLay and Polycast, will be used. Furthermore, after the 3D printing and casting of the different materials, the dimensions obtained in the models will be controlled in order to study the feasibility of replacing conventional models with 3D models, identifying the problems and discrepancies that appear in each process according to the ideal result to be obtained.

Keywords: 3D printing, model, lost wax, filament, casting.



ÍNDICE

Capítulo I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estructura	4
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1 Procesos y prácticas de fundición	6
2.2 Materiales utilizados en la fundición.....	7
2.3 Flujo del fluido.....	10
2.4 Características del metal fundido que afectan a la fluidez	12
2.5 Comparación de procesos actuales	12
CAPÍTULO 3. LA FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA	15
3.1 Introducción.	16
3.2 Explicación general del proceso:	16
3.3 Ventajas del proceso:	18
3.4 Limitaciones:	19
3.5 Creación del modelo	19
3.5.1 Diseño:.....	19
3.5.2 Modelo:.....	20
3.5.3 Bebedero en el modelo:	20
3.6 Ceras para moldear:	23
3.6.1 Contracción:	24
3.7 Herramientas para modelar la cera	26
3.8 El molde de caucho	27
3.9 Inyección de la cera	28
3.9.1 Extracción del patrón de cera	28
3.9.2 Contracción de la cera.....	29
3.10 Montaje de las ceras.....	29
3.10.1 Montaje en acerico	29
3.10.2 Montaje en árbol.....	30
3.11 Metal necesario para cada fundición	32
3.11.1 Determinación a través del volumen	32



3.11.2 Determinación por volumen de agua desplazado.....	33
3.11.3 Botón metálico o mazarota	33
3.12 Bases de bebedero	34
3.13 Cilindros de fundición	35
3.13.1 Materiales de los cilindros	35
3.13.2 Dimensiones de los cilindros	36
3.13.3 Holgura entre el cilindro y los modelos	36
3.14 Revestimiento	36
3.14.1 Tiempo de trabajo.....	37
3.15 Quemado.....	38
3.15.1 Quemado de modelos que no son de cera	39
3.16 Aleaciones.....	39
3.17 Fundición.....	39
3.17.1 Crisoles.....	39
3.18 Eliminación del revestimiento y enfriado.....	40
3.19 Operaciones de acabado	41
3.20 Defectos de fundición	41
CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPRESIÓN DE LOS MODELOS	43
4.1 Introducción	44
4.1.1 Modelaje en 3D.....	44
4.1.2 La impresión 3D.....	44
4.2 Elección del material	47
4.3 Diseño del modelo	48
4.3.1 Primer modelo.....	48
4.3.2 Segundo modelo	49
4.4 Conversión del modelo	53
4.5 Impresión del modelo en 3D.....	53
4.5.1 Software utilizado	53
4.5.2 Impresoras 3D utilizadas.....	54
4.5.3 Configuración de parámetros e impresión.....	58
4.6 Cambio del material	63
4.6.1 Problemas encontrados con HIPS	63
4.6.2 Nueva elección de material.....	63
CAPÍTULO 5. FUNDICIÓN DE LOS MODELOS	71



5.1 Introducción	72
5.1 Material utilizado	72
5.2 Método de fusión del material.....	72
5.3 Equipo y materiales específicos de cada proceso	73
5.3.1 Colada directa en molde de arena.....	73
5.3.2 Proceso a la cera perdida	74
5.4 Procesos de fundición	77
5.4.1 Colada directa en molde de arena.....	77
5.4.2 Proceso a la cera perdida.....	79
5.5 Resultados obtenidos.....	83
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	87
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA	89
CAPÍTULO 8: ANEXOS	93
8.1 Fichas técnicas de los materiales de impresión	94
8.2 Fichas de calibración.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes procesos de fundición. Fuente: [2].....	6
Figura 2. Preparación árbol de fundición. Fuente: [6].....	17
Figura 3. Vaciado de cera e introducción del revestimiento. Fuente: [6]	17
Figura 4. Introducción del metal y retirada de revestimiento. Fuente: [6].....	18
Figura 5 Longitud y colocación bebederos. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 6 Ejemplos de colocación de bebederos. Fuente: Elaboración propia.....	22
Figura 7. Ejemplos de colocación de bebederos. Fuente: Elaboración propia.....	22
Figura 8. Ejemplos de colocación de bebederos. Fuente: Elaboración propia.....	23
Figura 9. Fenómeno de contracción en la fundición. Fuente: [2].....	24
Figura 10. Molde de caucho. Fuente: [5].....	27
Figura 11. Montaje en acerico. Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 12.. Montaje en árbol con modelos hacia la base. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 13. Montaje en árbol con modelos orientados correctamente. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 14. Colector de fundente e impurezas. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 15. Botón metálico o mazarota. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 16. Base con agujero central. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 17. Crisoles. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 18. FDM. Fuente: [11].....	45
Figura 19. SLS. Fuente: [12]	46
Figura 20. Bobina de HIPS. Fuente: [15]	47
Figura 21. Cilindro de fundición 66mm. Fuente: Elaboración propia	48
Figura 22. Primer modelo diseñado. Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 23. Segundo modelo diseñado. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 24. Imagen del modelo sólido. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 25. Software CURA. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 26. Extrusión filamento. Fuente: [18].	55
Figura 27. Impresora sigma bcn3d. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 28. Creatily Ender 3 Pro. Fuente: Elaboración propia.....	57
Figura 29. Impresora Artillery Sidewinter x2. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 30. Parámetros CURA. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 31. Parámetros CURA. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 32. Modelo impreso con poliestireno de alto impacto. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 33. Calibre digital 0-150 mm. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 34. Rugosímetro Taylor Hobson. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 35. Bobina de Moldlay de 2,85mm de diámetro. Fuente: Elaboración propia.64	
Figura 36. Bobina de MoldLay diámetro 1,75mm. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 37. Cilindros realizados con MoldLay. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 38. Medición de la rugosidad media de los cilindros. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 39. Primera prueba con Polycast. Fuente: Elaboración propia	69



Figura 40. Segunda prueba con Polycast. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 41. Cilindros de material Polycast. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 42. Fusión del latón con acetileno. Fuente: Elaboración propia.....	73
Figura 43. Semi cajas y arenas. Fuente: Elaboración propia.....	74
Figura 44. Horno del taller de la universidad. Fuente: Elaboración propia.	74
Figura 45. Cilindro utilizado para la fundición. Fuente: Elaboración propia	75
Figura 46. Útil para cilindros de fundición. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 47. Máquina de vacío. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 48. Revestimiento Plasticast. Fuente: Elaboración propia.....	76
Figura 49. Colada directa con poliestireno de alto impacto. Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 50. Modelo de poliestireno de alto impacto en la semi caja tras la fundición. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 51. Bebedero y modelo de poliestireno de alto impacto. Fuente: Elaboración propia.....	78
Figura 52. Cilindro adherido al tronco central de cera. Fuente: Elaboración propia. .	79
Figura 53. Preparación del cilindro de fundición. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 54. Cilindro de fundición completo con revestimiento. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 55. Horno del taller de fabricación realizando el quemado de los modelos. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 56. Extracción del cilindro de fundición. Fuente: Elaboración propia.....	81
Figura 57. Latón ya vertido en el útil para cilindros, tras la realización del vacío. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 58. Bidón de agua con el cilindro de fundición sumergido. Fuente: Elaboración propia.....	82



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Términos de la ecuación 1. Fuente: [2]	11
Tabla 2. Términos de la Ecuación 2. Fuente: [2]	11
Tabla 3. Comparación de procesos de fundición. Fuente: [4]	13
Tabla 4. Comparación de los mejores procesos para este trabajo. Fuente: [4]	14
Tabla 5. Porcentajes de contracción según material. Fuente: [3]	25
Tabla 6. Elementos de ecuaciones 3, 4 y 5. Fuente: [7]	25
Tabla 7. Herramientas utilizadas para modelar la cera. Fuente: [5]	26
Tabla 8. Materiales para los moldes. Fuente: [5]	28
Tabla 9. Densidad del oro amarillo de 18 quilates. Fuente: [5]	33
Tabla 10. Consideraciones generales sobre revestimientos. Fuente: [5]	37
Tabla 11. Medidas reales pieza de poliestireno de alto impacto. Fuente: Elaboración propia	62
Tabla 12. Medidas cilindro grande MoldLay Fuente: Elaboración propia	67
Tabla 13. Medidas realizadas en cilindros pequeños de MoldLay. Fuente: Elaboración propia	67
Tabla 14. Dimensiones y rugosidad cilindros de Polycast. Fuente: Elaboración propia.	70
Tabla 15. Dimensiones finales de los modelos. Fuente: Elaboración propia.	84
Tabla 16. Proceso completo con MoldLay. Fuente: Elaboración propia.	85
Tabla 17. Proceso completo con Polycast. Fuente: Elaboración propia.	86



Capítulo I: INTRODUCCIÓN



1.1 Introducción

La metalurgia y más en concreto la fundición son quizás algunas de las innovaciones más importantes en la historia de la humanidad, ya que introdujeron grandes cambios en el transporte, la guerra, el comercio, la agricultura, etc.

La metalurgia, como se la conoce actualmente, se desarrolló en un período de aproximadamente 6500 años. La invención y el posterior desarrollo de la metalurgia y la fundición fueron utilizados por las civilizaciones para obtener armas, herramientas, instrumentos agrícolas, artículos domésticos, decoraciones, etc.

Los primeros metales utilizados fueron el oro, la plata y el cobre, ya que estos se encontraban directamente en la naturaleza, no era necesario realizar algún proceso para obtenerlos.

En la Edad de Piedra , estos metales se utilizaban de forma decorativa y práctica. El oro se podía formar en pedazos más grandes a través del martilleo en frío, pero el cobre no. Alrededor del 7000 a. C., se comenzó a martillar cobre en navajas y cuchillos crudos; estas herramientas duraban más que las herramientas de piedra y eran igual de efectivas, por lo que se continuó realizando este tipo de técnica.

El descubrimiento de que metales como el cobre, como elemento tecnológico fundamental, además de obtenerse en su estado natural, podían extraerse de su mineral calentando el metal más allá de su punto de fusión, y que tales metales podían moldearse y fundirse en moldes, fue fundamental para el inicio de la Edad de los Metales (6000 a.C).

Se cree que la primera fundición de metal se realizó en el Medio Oriente y probablemente el metal utilizado fue el cobre, ya que los primeros objetos conocidos que se formaron a través de la fundición combinada con moho son hachas de cobre en los Balcanes, que datan del cuarto milenio a.C.

El siguiente descubrimiento importante surgió de la combinación de cobre y estaño, ya que se consiguió un metal distinto con mejores características, el bronce.

Entre la Edad de Piedra y la Edad de Bronce (comprendida dentro de la Edad de los Metales), se produjo un período de transición que recibió su nombre por la combinación de los materiales cobre y piedra: el Período Calcolítico, extendiéndose aproximadamente entre los años 3000 y 1700 a.C.

En el año 2500 a. C. en Egipto, existía una técnica llamada soldadura fuerte, que unía los metales fundiendo y haciendo fluir un metal de relleno en la junta,



usada para soldar vasijas o joyería, lo que demuestra el gran avance que supuso la unión de los metales. Esta técnica también era ampliamente utilizada en Grecia en la misma época, y se sigue utilizando actualmente.

El paso más importante en la evolución de la fundición se dio con el comienzo del uso del hierro, ya que es el material más utilizado para fundiciones. Los primeros artefactos de hierro datan del 2500 a.C en tumbas hititas (actualmente Turquía). También se piensa que alrededor del 1800 a.C ya se trabajaba el hierro en la India. En Europa, por su parte, la introducción del hierro se dio aproximadamente entre los años 1000-1100 a.C llegando a la parte mediterránea y expandiéndose lentamente. La fabricación con hierro ya había llegado a Gran Bretaña en el momento de la invasión del imperio romano, hacia el 55 a.C.

Cabe destacar la publicación sobre el conocimiento metalúrgico en el libro *De Re Metallica* (libro que aborda en detalle el estado de la minería, refinado y fundición) durante el siglo XVI d.C por Georg Agrícola, considerado el padre de la mineralogía.

Las primeras grandes fundiciones de hierro se establecieron en el Reino Unido en 1700 d.C. Los primeros hornos fueron alimentados por carbón hasta el siglo XVIII, que se introdujo en Inglaterra el coque, un residuo sólido formado por el calentamiento de carbones bituminosos, que cuenta con un alto poder calorífico (mayor generación de calor al oxidarse).

Como resultado de la evolución en la técnica de la fundición, se empezaron a crear los primeros hornos similares a los actuales, los hornos de aire o de convección forzada y el horno de arco eléctrico, como solución al problema de alcanzar las altas temperaturas requeridas para la fundición.[1]

1.2 Objetivos

El objetivo de este TFG es estudiar distintos materiales al ser utilizados como modelos o moldes en distintos procesos de fundición a partir de su creación e impresión en 3D, evaluando si son óptimos o no para la metodología escogida.

Conseguir que las dimensiones, el acabado superficial y las partes más complejas de las piezas obtenidas con este proceso se asemejen lo máximo posible a una pieza ideal que se obtendría con un modelo creado por mecanizado, extrusión...etc.

Evaluar si el proceso de la fundición a la cera perdida es adecuado para la obtención de modelos finales óptimos a partir del uso de modelos diseñados e impresos en 3D.



1.3 Estructura

Capítulo 1: Introducción.

Se realiza una pequeña introducción sobre la evolución histórica de la fundición, se enumeran los objetivos que se buscan conseguir en la realización del trabajo del fin de grado y se plantea la estructura que seguirá el mismo.

Capítulo 2: Estado del arte.

En este capítulo se expresa en qué situación se encuentra la fundición en un ámbito general, enunciando los distintos procesos utilizados. Además, se explica la versatilidad que nos ofrece cada proceso para la utilización en este trabajo.

Capítulo 3: La fundición a la cera perdida.

En este capítulo se describe el proceso de fundición a la cera perdida, proceso elegido para la parte práctica de este trabajo de fin de grado, ya que no es un proceso tan conocido como otras fundiciones más comunes.

Capítulo 4: Diseño e impresión de los modelos.

Se describirá el proceso seguido desde que se inicia el diseño del modelo en 3D hasta que se realiza su impresión. Citando materiales y equipos utilizados, así como los software empleados en el proceso.

Capítulo 5: Fundición de los modelos.

Se enuncian los distintos equipos utilizados en las fundiciones, así como los procesos utilizados, indicando los pasos realizados para cada proceso y los problemas encontrados.

Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras.

Se analizan los resultados obtenidos tras la fundición de los modelos, analizando los distintos materiales fundidos y la viabilidad de los procesos que se han utilizado.

Capítulo 7: Bibliografía.

Se incluye la bibliografía consultada para la realización del trabajo de fin de grado.

Capítulo 8 : Anexos.

Se añaden diversas fichas técnicas y de calibración utilizadas para la realización del trabajo de fin de grado.



CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Procesos y prácticas de fundición

De forma global, en la Figura 1 se pueden ver distintos procesos de fundición utilizados hoy en día, divididos por moldes y modelos desechables/no desechables.

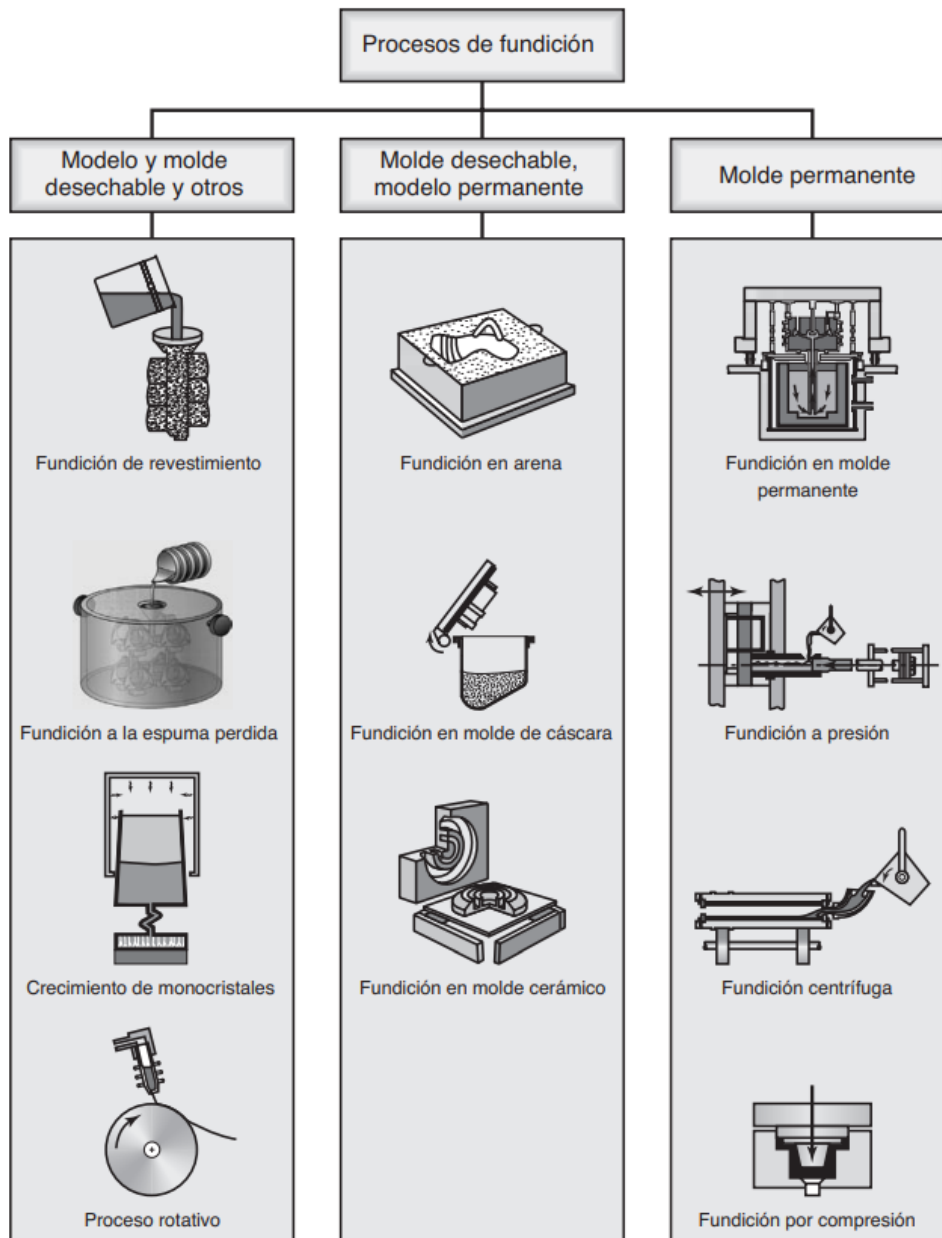


Figura 1. Diferentes procesos de fundición. Fuente: [2]

La clasificación de los tipos de moldes que se utilizan se puede realizar de la siguiente manera:



- **Moldes desechables:** En este tipo de moldes, una vez que la fundición ha solidificado, el molde se rompe para retirar el modelo requerido. Suelen producirse con arena, yeso o cerámica mezclados con diversos aglutinantes para mejorar sus propiedades. Todos estos materiales son refractarios, ya que deben ser capaces de soportar las altas temperaturas que alcanzan los metales fundidos.
- **Moldes permanentes:** Estos moldes no se rompen al haber solidificado la fundición, se utilizan en repetidas ocasiones y se diseñan de forma que las fundiciones se puedan retirar con facilidad y sea posible su reutilización. Están fabricados con metales capaces de mantener una buena resistencia a temperaturas elevadas. Al ser metálicos, conducen mejor el calor que los moldes que no lo son. En consecuencia, la solidificación se produce más rápido, lo que cambia la microestructura y el tamaño de grano de la fundición.
- **Moldes compósitos:** Se producen a partir de la unión de dos o más materiales (como arenas, grafitos y metales), mejorando las características individuales y las ventajas de cada uno. En estos moldes existen dos partes, una permanente y otra desechable, y son utilizados en diversos procesos de fundición para mejorar la resistencia del molde, controlar las velocidades de enfriamiento y minimizar el coste global del proceso de fundición.

2.2 Materiales utilizados en la fundición

Los materiales utilizados para las fundiciones se dividen en dos grandes grupos, las aleaciones no ferrosas y las aleaciones ferrosas.

Aleaciones no ferrosas:

- **Aleaciones con base de aluminio:** Compuestas por combinaciones de aluminio con cobre, silicio, magnesio, zinc o estaño. Hay distintas series según el material que acompañe al aluminio, por ejemplo, en la aleación A03190 la A corresponde al aluminio, la 0 al tratamiento térmico utilizado en la aleación (en este caso recocido), el 3 representa la serie aluminio-silicio (la numeración va desde el 1 hasta el 8 según la composición), los dos siguientes números no tienen importancia en esta serie y el último número indica la forma del producto. Esta aleación alcanza los 250 MPa de resistencia a la tracción y los 180 MPa de resistencia a la fluencia. Estas aleaciones destacan por su buena conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión atmosférica. Además, no son tóxicas, su peso es ligero y tienen una maquinabilidad



adecuada. Utilizadas en automoción o como uso arquitectónico y decorativo.

- **Aleaciones con base de magnesio:** Compuestas por combinaciones entre aluminio, zinc, manganeso, zirconio y torio. Por sus características destaca la aleación AZ80A (dos primeros dígitos de los elementos principales, dos números redondeados al menor valor con el porcentaje de los elementos principales y una letra que indica si es la primera normalización de la aleación (A), la segunda (B), etc.). La composición de esta aleación se divide en un 8,5% de aluminio, 0,5% de zinc y 0,2% de Manganeso. Alcanza los 380 MPa de resistencia a la tensión y 275 MPa de resistencia a la fluencia, siendo estos los mayores valores entre las aleaciones con base de magnesio. Tienen buena resistencia a la corrosión y se utilizan en pequeños componentes de aeronaves, misiles, bicicletas..., artículos ligeros en general.
- **Aleaciones con base de cobre:** Compuestas por combinaciones de cobre, zinc y plomo. Por sus características destaca el latón para cartuchos de municiones denominado C26000 (primera letra correspondiente al cobre), que cuenta con un 70% de cobre y un 30% de zinc. Alcanza hasta los 900 MPa de resistencia a la tracción y los 450 de resistencia a la fluencia. Para obtener una aleación de buena maquinabilidad, su composición aproximada será de un 61,5% de cobre, 3% de plomo y 35,5% de zinc, denominándose latón libre maquinado (C36000), alcanza los 470 MPa de resistencia a la tensión y 310 MPa a la fluencia, valores menores que la C26000. Cuentan con muy buena conductividad eléctrica y térmica, resistencia a la corrosión y nula toxicidad. Sus aplicaciones varían desde los elementos decorativos hasta piñones, tensores, extintores, etc.
- **Aleaciones con base de zinc:** Aleación con elementos como el cobre, aluminio y magnesio. Excelente resistencia a la corrosión, buena fluidez y suficiente resistencia estructural. Utilizadas en fundiciones a presión, sobre todo para zonas de paredes delgadas.
- **Aleaciones con base de plomo:** Aleación con elementos como el antimonio y el estaño. Baja resistencia, pero resisten bien la corrosión. Aun así, su toxicidad es una gran desventaja para su aplicación.

Aleaciones ferrosas:

- **Hierro fundido:** Familia de aleaciones compuestas por hierro, carbono (del 2,11 al 4,5%) y silicio hasta el 3,5%. Su denominación se identifica con el código ASTM (American Society for Testing and Materials) seguido de distintos dígitos en función del tipo de hierro obtenido, por ejemplo, una fundición ASTM20 (hierro fundido gris) indica que el material tiene una resistencia a la tracción de 20 kpsi (140 MPa).

Se clasifican en función de su solidificación, lo que cambia la forma del grafito de su microestructura. Esta clasificación es la siguiente:

- **Hierro fundido gris:** Grafito en forma de hojuelas. La matriz puede estar compuesta de ferrita, perlita o martensita.
 - **Hierro dúctil (nodular):** Grafito en forma nodular o esferoidal, siendo dúctil y resistente al impacto.
 - **Hierro fundido blanco:** Grandes cantidades de carburo de hierro en lugar de grafito. Estructura muy dura, resistente al desgaste y frágil.
 - **Hierro maleable:** Hierro fundido blanco recocido, lo que disocia la cementita en hierro y grafito (con forma de rosetas) en matriz ferrítica o perlítica. Gran ductilidad, resistencia y resistencia al impacto.
 - **Hierro de grafito compactado:** Grafito en forma de hojuelas cortas, con superficie ondulada y extremidades redondas. Propiedades intermedias entre hierro fundido gris y nodular.
- **Aceros fundidos:** Los aceros fundidos contienen carbono como principal elemento de aleación. Otros elementos existentes son el manganeso (hasta un 1%), níquel (hasta un 0,5%), cobre (hasta un 0,5%), silicio (hasta un 0,8%), cromo (hasta un 0,25%), etc.

Estos aceros se clasifican en tres grandes grupos según su contenido en carbono:

- **Aceros bajos en carbono:** 0 - 0,2 % de carbono.
- **Aceros de carbono medio:** 0,2 - 0,5 % de carbono.
- **Aceros con alto contenido en carbono:** 0,5 - 2,11 % de carbono.

El porcentaje de carbono existente determinará las propiedades mecánicas de estos aceros, a mayor cantidad de carbono, mayor dureza y fragilidad.



Denominados también como ASTM o AISI/SAE (ASTM es un sistema de denominación que incorpora a los otros dos). Por ejemplo, en un acero AISI/SAE 1020, el primer dígito indica el elemento principal de aleación (carbono), mientras que los siguientes tres dígitos indican que el acero tiene un 0,20 % de carbono, para un AISI 1045 el porcentaje de carbono sería 0,45 %.[2][3]

La mayor ventaja de su utilización es que pueden ser soldados, sin embargo, esta soldadura altera las propiedades y la microestructura de la zona circundante, por lo que deberían ser tratadas térmicamente para obtener sus características anteriores. Gracias a esto, tienen una gran utilización en ensamble de máquinas y estructuras grandes.

- **Aceros inoxidables fundidos:** Su denominación es igual que las anteriores, pueden estar identificados con las siglas ASTM, AISI o SAE. Para que un acero sea considerado inoxidable, su contenido en cromo debe ser, al menos, de un 10 % en peso, de lo contrario no aparecerá la película protectora contra la corrosión. Otros elementos de aleación típicos son el níquel, molibdeno, cobre, titanio, silicio, manganeso, etc. Son similares a los aceros fundidos, pero con grandes aplicaciones para ambientes severamente corrosivos y para servicios de alta temperatura, como, por ejemplo, tanques, bombas o tuberías en la industria química.

2.3 Flujo del fluido

Mantener un flujo fluido es vital para poder obtener una fundición satisfactoria. Esto requiere unos sistemas de alimentación especialmente diseñados y un control adecuado en el proceso de solidificación del metal. Un sistema de alimentación diseñado de forma óptima es capaz de atrapar contaminantes, evitar enfriamientos prematuros, evitar turbulencias en el flujo, facilitar el escape de gases...etc.

Por ello, existen varios principios de diseño, pero se va a enunciar uno de ellos, el principio de conservación de masa:

Según la ley de continuidad de masa, para líquidos incompresibles en un sistema impermeable (sin pérdidas), la velocidad de flujo debe ser constante, por tanto:

$$Q = A_1 * v_1 = A_2 * v_2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Tabla 1. Términos de la ecuación 1. Fuente: [2]

Q	Gasto volumétrico (m^3*s^{-1})
A	Área de sección transversal de corriente del líquido (m^2)
v	Velocidad promedio del líquido en la sección ($m*s^{-1}$)

De acuerdo con esta ley, el gasto debe mantenerse constante en cualquier parte del recorrido si queremos asegurar una buena fluidez. Para ello, es muy importante que las paredes sean impermeables, de lo contrario el líquido se filtraría por las paredes y disminuiría el gasto volumétrico.

Otra magnitud importante en cuanto a la fluidez es la turbulencia, cuantificada por el número de Reynolds.

$$Re = \frac{v*D*\rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 2}$$

Tabla 2. Términos de la Ecuación 2. Fuente: [2]

v	Velocidad del líquido ($m*s^{-1}$)
D	Diámetro del canal (m)
ρ	Densidad del líquido (kg/m^3)
μ	Viscosidad del líquido ($Pa*s$)

En función del valor de este número adimensional, el flujo tomará una de las tres posibles configuraciones:

- **Flujo laminar:** Valores de Reynolds menores a 2.000. Flujo estable.
- **Flujo transitorio:** Valores de Reynolds comprendidos entre 2.000 y 20.000. Empiezan a aparecer las primeras turbulencias.
- **Flujo turbulento:** Valores superiores a 20.000. Turbulencias severas, con aire atrapado en el recorrido y formación de espumas (nata que se crea en la superficie del metal fundido).

Para minimizar estas turbulencias, es importante evitar cambios súbitos en la dirección del flujo y en la geometría de las secciones transversales de los canales de alimentación.



2.4 Características del metal fundido que afectan a la fluidez

- **Viscosidad:** A mayor valor de viscosidad, menor fluidez en el flujo.
- **Tensión superficial:** Una gran tensión superficial reduce la fluidez del líquido.
- **Inclusiones:** Las inclusiones son insolubles, por lo tanto, afectan negativamente a la fluidez del metal.
- **Diseño del molde:** Tanto el diseño del molde, como de bebederos, canales y mazarotas afectan a la fluidez.
- **Material del molde y características superficiales:** Cuanto mayor sea la conductividad térmica del molde y más rugosa la superficie, menor será la fluidez.[2]

2.5 Comparación de procesos actuales

Es interesante comparar las características que nos ofrecen los distintos procesos de fundición hoy en día. Además, en este trabajo se va a utilizar un proceso de fundición combinado con la impresión 3D. Por lo tanto, hay ciertos factores importantes que se deben evaluar, como, por ejemplo:

- Es necesario que se pueda obtener un buen acabado superficial, ya que el modelo final debe tener la mejor estética posible.
- Es importante que el proceso sea capaz de adoptar formas lo más complejas posibles para que pueda cubrir la variabilidad existente.
- La precisión dimensional es clave, para no encontrar desajustes entre modelos creados al ser montados, medidas muy importantes a la hora del funcionamiento de una pieza..., etc.

A continuación, se realiza una pequeña comparación (Tabla 3) relacionando puntos importantes de la industria hoy en día, en la que se dan unos valores orientativos dependiendo del proceso de fundición utilizado. Para la complejidad de forma y la precisión dimensional la mejor calificación se dará como un 1 y la peor con un 5.

Tabla 3. Comparación de procesos de fundición. Fuente: [4]

Proceso	Material a fundir	Masa (kg)	Acabado superficial (Ra; μm)	Complejidad de forma	Precisión dimensional	Espesor mínimo de la sección (mm)
Cera perdida	Cualquiera	0,005-100	1,9	1	1	1-75
Arena	Cualquiera	0,05-	12,5-25	1-2	3	2
Moldeo en cáscara	Cualquiera	0,05-1000	6,3	2-3	2	2
Moldeo en yeso	No férreo	0,05-50	1-3	1-2	2	1
Molde permanente	Cualquiera	0,5-300	2-3	3-4	2	2-50
Molde desechable	Cualquiera	0,05-	5-20	1	2	2-
Troquel	No férreo	0,05-50	1-2	3-4	1	0,5-12

Analizando esta tabla, en cuanto al acabado superficial, el molde en yeso, la cera perdida y el troquel no superan los dos micrómetros, por lo que destacan sobre los demás procesos.

Para la complejidad de forma, los procesos más apropiados serían tanto la cera perdida como la fundición con moldes desechables, siendo aceptables también los valores del moldeo en arena y en yeso.

Por último, relativo a la precisión dimensional, destacan de nuevo tanto la cera perdida como el troquel, mientras que el molde de arena se ve bastante limitado.

A partir de este pequeño análisis, se comparan directamente los dos procesos que reciben mejores resultados en general, la cera perdida y el molde en yeso, para poder tener información sobre el más adecuado para nuestro trabajo.

Tabla 4. Comparación de los mejores procesos para este trabajo. Fuente: [4]

Proceso	Material a fundir	Masa (kg)	Acabado superficial (Ra; μm)	Complejidad de forma	Precisión dimensional	Espesor mínimo de la sección (mm)
Cera perdida	Cualquiera	0,005-100	1,9	1	1	1-75
Moldeo en yeso	No férreo	0,05-50	1-3	1-2	2	1

Como se puede ver en la tabla 4, la cera perdida sería, hoy en día, el proceso de fundición más indicado para el trabajo que se va a realizar.

En general, la cera perdida da una mayor libertad de diseño, admitiendo más complejidad y además es capaz de funcionar con cualquier material.[4]



CAPÍTULO 3. LA FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA

3.1 Introducción.

La mejora en el proceso de fundición nos acercó a una técnica que permite la reproducción de objetos previamente creados en un material que más tarde será eliminado, como la cera, con la utilización de modelos desechables. Este fue el primer paso del proceso bien conocido como fundición a la cera perdida.

El concepto cera perdida se refiere a la realización del proceso con un modelo de cera, el cual se recubre posteriormente con un material refractario con el que se forma el molde que, más tarde, se quema para eliminar la cera “que se pierde”.

El origen de esta técnica tiene opiniones dispares, entre el 4000 y el 2000 antes de Cristo, en Egipto, Grecia y China. Hacia el 400 a.C se desarrolló independientemente en el nuevo mundo (América del sur), siendo utilizada por los indios precolombinos para reproducir las complicadas piezas de oro existentes hoy en día en algunos museos. En el libro de Isaiah (712 a.C), se citan diversos elementos creados con esta técnica, como por ejemplo una figura de bronce de Nero junto al templo de Venus en Roma.

A inicios del siglo XI ya se utilizaba esta técnica en fábricas de Alemania, ya que existían numerosos elementos religiosos (como pilas bautismales) fundidos de una sola pieza, totalmente irrealizables en fundiciones en arena. Con el paso del tiempo, esta técnica prácticamente desapareció , excepto para algunos joyeros.

No fue hasta aproximadamente 1907 que este proceso comenzó a utilizarse en la tecnología dental, convirtiéndose en un proceso fundamental en este ámbito. Esto llevó a la introducción de la cera perdida en los talleres de joyería de la época.

Actualmente, tiene una gran variedad de usos, siendo útil tanto para piezas únicas como para piezas en serie, destacando en la joyería moderna gracias a la reproducción de piezas de forma rápida y precisa.[5]

3.2 Explicación general del proceso:

Fundamentalmente, la fundición a la cera perdida consiste en que uno o varios modelos de cera son reemplazados por un metal (en nuestro caso el modelo será una pieza imprimida por 3D con la utilización de distintos materiales), para obtener el número de réplicas que se necesiten.

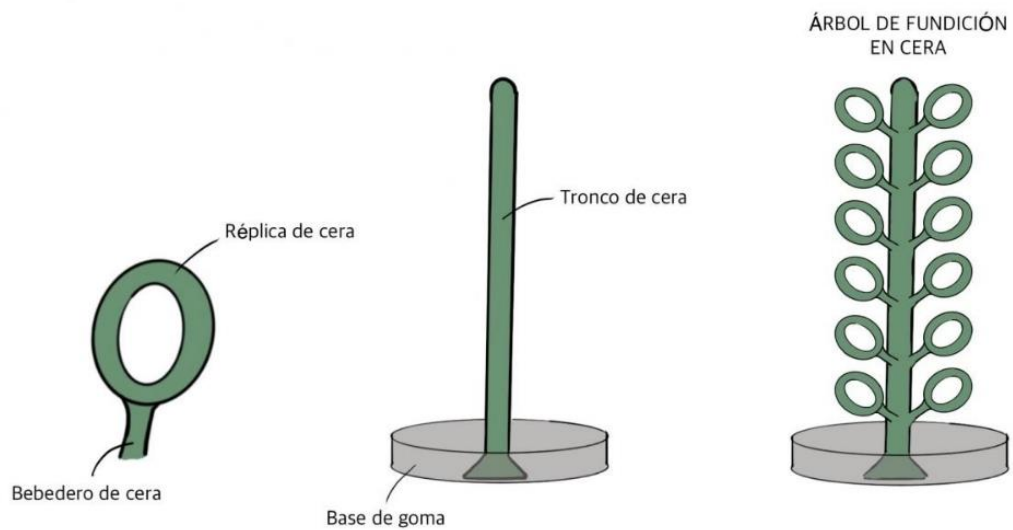


Figura 2. Preparación árbol de fundición. Fuente: [6]

Se prepara un tronco de cera, colocado en una base de goma circular con un agujero central. Sobre este tronco se unen el número de modelos que queramos obtener en el metal deseado después de verter la colada. Esta unión se realiza por el bebedero para que el metal fundido fluya al modelo. A su vez, el bebedero se une al tronco de cera mediante una pequeña soldadura o simplemente por pegado. Así, se genera un árbol cuyas ramificaciones son las piezas.

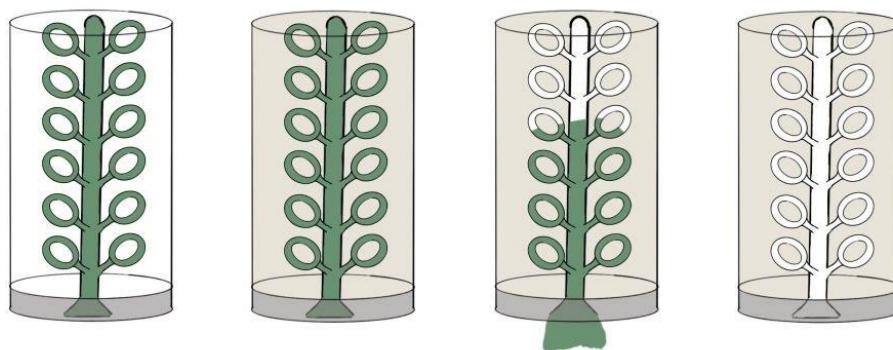


Figura 3. Vaciado de cera e introducción del revestimiento. Fuente: [6]

Posteriormente, el árbol con su base se acopla a un cilindro de acero (llamado cilindro de fundición). Una base de goma que será retirada posteriormente servirá para sellar una de las dos caras del cilindro.

A continuación, se introduce el revestimiento que sellará todos los huecos existentes, rodeando por completo a los modelos de cera, llegando al nivel de la tapa superior del cilindro.

Una vez endurecido el revestimiento (fraguado), se retira la base de goma para realizar el quemado de la cera, que sale por el agujero central.

De este modo, obtenemos un molde de las piezas que queremos obtener.

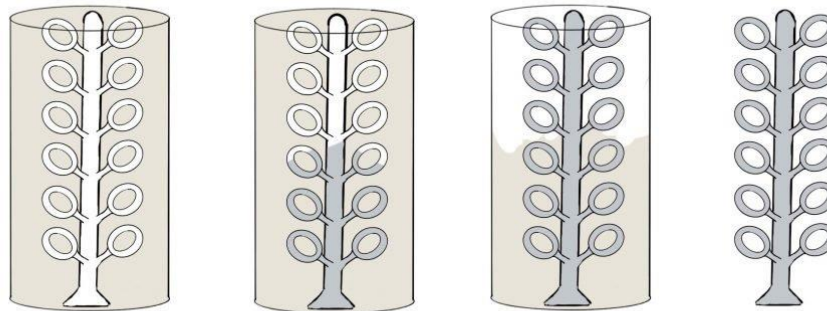


Figura 4. Introducción del metal y retirada de revestimiento. Fuente: [6]

Posteriormente, se rellena el molde interior al revestimiento de un material fundido (generalmente aleaciones).

Para finalizar, una vez solidificado el material fundido, se introduce el cilindro en una composición determinada de agua, en la que el revestimiento se desprenderá por sí mismo, obteniendo así nuestro árbol con todos los modelos en el material férreo escogido. Por lo tanto, el último paso sería separar cada pieza de manera individual, cortar su bebedero y acabar su superficie si es necesario.[2]

3.3 Ventajas del proceso:

- Método muy apropiado para procesos con costes elevados (gran mano de obra, soldaduras complicadas...).



- Para un modelo hecho a mano (en nuestro caso 3D), se pueden obtener infinita cantidad de piezas que sólo necesitarán un mínimo retoque posterior.
- Pueden fundirse varias piezas a la vez (árbol de fundición).
- Las cajas de moldeo son muy económicas, además, es un proceso simple, ya que no existen líneas de partición, machos o mazarotas.
- El metal perdido queda reducido en gran medida. Además, la estructura de grano es más compacta y menos porosa que en cualquier fundición por gravedad.

3.4 Limitaciones:

- Es necesario tener una alta cualificación tanto para el proceso como para el control de cada aleación en particular, ya que las exigencias actuales son muy altas.
- Como toda fundición conocida, aunque el aspecto superficial puede ser similar, su interior no se puede comparar con una pieza forjada o estampada. Son mucho menos flexibles y pueden presentar porosidades/oquedades interiores.

3.5 Creación del modelo

3.5.1 Diseño:

La calidad de la pieza resultante depende, en gran medida, del grado de perfección del modelo diseñado. Debe adecuarse cada modelo con las cualidades estéticas que ofrezca cada metal o aleación.

Es importante destacar, además de las consideraciones estéticas, las siguientes consideraciones prácticas:

El tamaño de la pieza debe ajustarse al cilindro, su espesor no debe ser muy grueso (mucho peso) ni muy fino (complicaciones al llenar el molde), además, el espesor también influye en el ámbito económico, ya que esta técnica es muy usada en metales preciosos y como sabemos su peso es muy importante al determinar su valor.



3.5.2 Modelo:

En el caso de la fundición a la cera perdida, como vimos anteriormente, es un elemento que se rodea por completo de revestimiento refractario. Posteriormente será calentado para su eliminación, obteniendo así la cavidad o molde deseada para introducir el metal fundido requerido.

De entre todos los métodos empleados en la fabricación de joyas, el trabajo con la cera es el más económico, requiriendo herramientas y materiales de muy bajo coste.

La adhesión del bebedero al modelo puede realizarse simplemente por pegado si el modelo es de cera. Si tenemos otro material, la unión puede darse como una soldadura o utilizando un cemento adhesivo apropiado.

3.5.3 Bebedero en el modelo:

Al eliminarse la cera por calentamiento, el espacio dejado por el bebedero será el canal que utilizará el metal fundido para fluir hacia los modelos.

El bebedero debe estar diseñado de una forma óptima, permitiendo al metal llegar a cualquier punto de la cavidad para evitar que el modelo se estropee a la hora de fundir.

3.5.3.1 Material del bebedero:

Es importante que la cera o el material del bebedero sea especial, para que se derrita antes que el modelo, proporcionando un quemado rápido y eficiente, ya que si fuese al contrario, podría quedar algún resto de cera obstruido en la cavidad del modelo.

3.5.3.2 Espesor del bebedero:

Para piezas muy grandes se pueden utilizar bebederos de hasta 25 mm de diámetro o más, pero no es lo habitual.

Como es entendible, el espesor del bebedero varía en función de las dimensiones y forma del modelo y del metal fundido. A mayor peso en el modelo, mayor diámetro requerirá el bebedero.

3.5.3.3 Longitud/colocación de los bebederos:

En esta ocasión, es mejor pecar por defecto que por exceso.

En la Figura 5 se pueden ver tres configuraciones para un anillo. En la izquierda vemos un bebedero de excesiva longitud, delgado y conectado a la parte más delgada del anillo, lo cual es incorrecto. En esta situación es posible que el metal solidifique en el bebedero antes de llenar todo el molde.

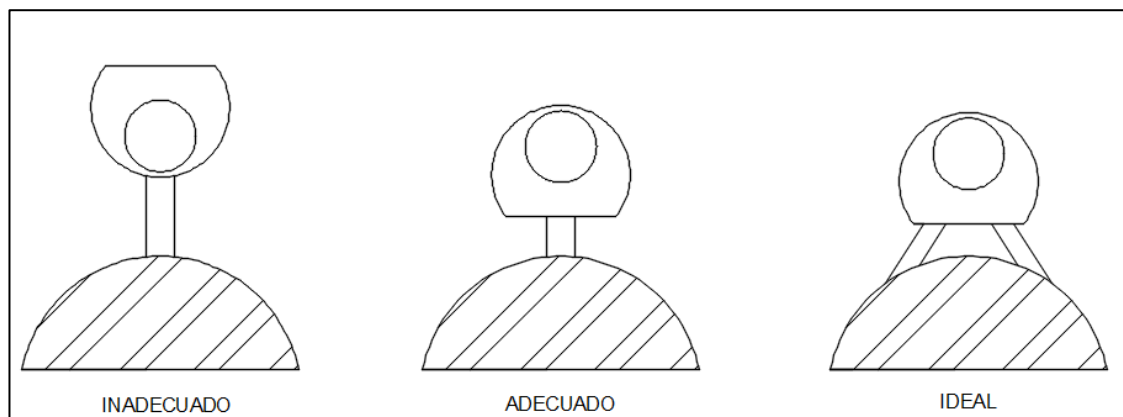


Figura 5 Longitud y colocación bebederos. Fuente: Elaboración propia.

La colocación se debe dar en un punto en el que no resulte difícil su eliminación después de la fundición.

Normalmente, se conecta en las partes más gruesas del modelo, ya que son aquellas que durante la fundición necesita recibir mayor cantidad de metal.

Más consideraciones a tener en cuenta:

- El metal inyectado suele desplazarse en línea recta, por lo que si a su paso se producen cambios de dirección de 90° o más, disminuye su velocidad de flujo.
- El metal se enfría al entrar en contacto con el yeso/revestimiento.
- La fuerza del flujo se debilita a medida que penetra en la cavidad del molde.

Otros ejemplos de colocación de bebederos:

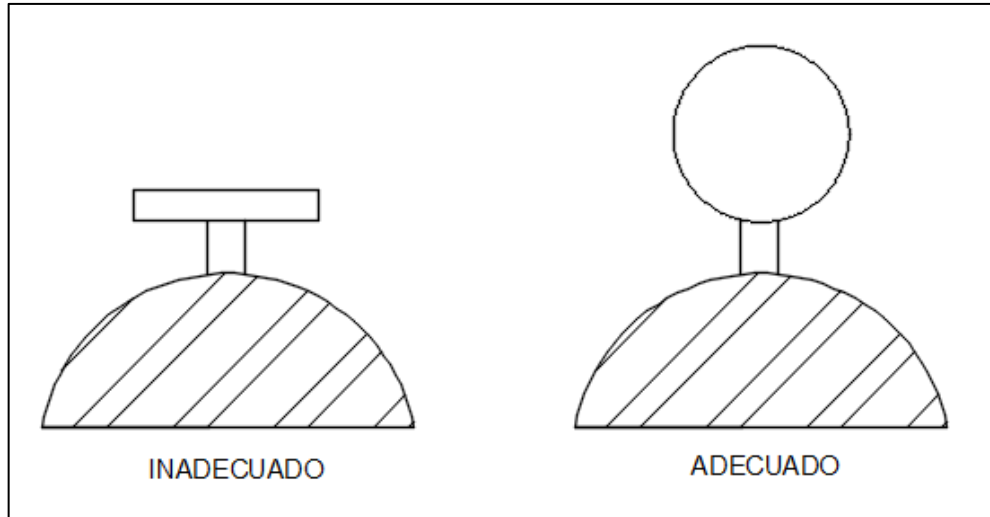


Figura 6 Ejemplos de colocación de bebederos. Fuente: Elaboración propia.

Primer ejemplo (Figura 6): En un disco, no podemos colocar el bebedero en su superficie plana, ya que se crearía una superficie a 90° . Como hemos visto anteriormente, el bebedero se debe situar preferiblemente en la dirección que fluirá el metal para un correcto llenado.

Es importante recalcar que a la hora de elegir entre colocar el bebedero en una parte plana o en un borde debemos elegir el borde. Resulta más fácil de eliminar y obtenemos más garantías de no estropear el modelo a la hora de eliminar por completo el bebedero, por ejemplo, al esmerilar el sobrante.

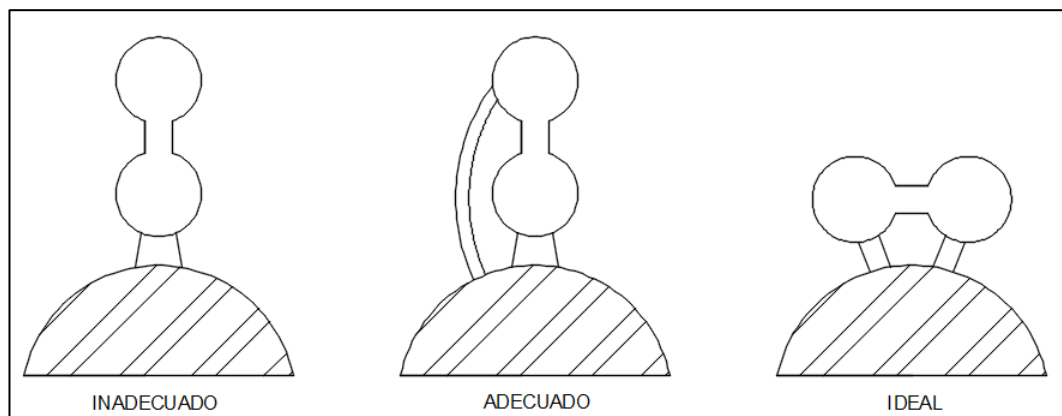


Figura 7. Ejemplos de colocación de bebederos. Fuente: Elaboración propia.

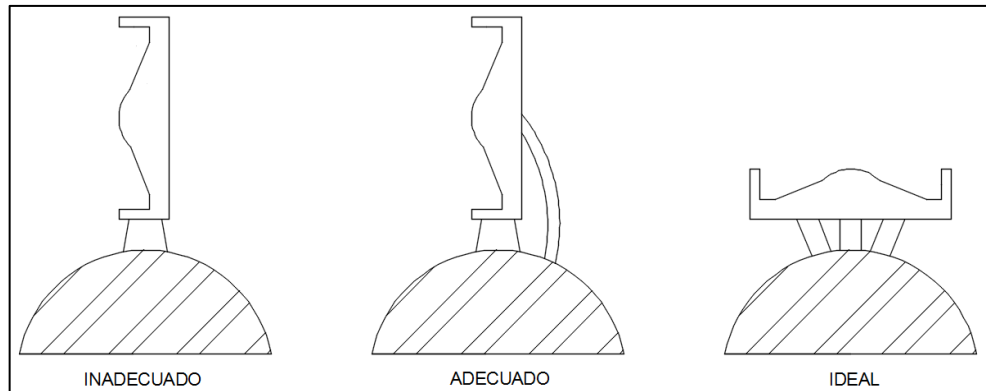


Figura 8. Ejemplos de colocación de bebederos. Fuente: Elaboración propia.

Segundo ejemplo, piezas con zonas gruesas y delgadas (Figuras 7 y 8): El metal se enfría más rápido en las zonas estrechas, ya que estas zonas no permiten un periodo de fluidez tan prolongado. Esto origina ciertas porosidades en el modelo final.

Si en una pieza hay secciones gruesas separadas por delgadas o la pieza es bastante grande, es necesario colocar bebederos adicionales. Estos bebederos se pueden colocar en la mitad o a dos tercios del recorrido del metal, ya que así se refuerza la presión de la inyección antes de debilitarse.

3.6 Ceras para moldear:

Los modelos se preparan con ceras especiales, ya que es necesario que no dejen prácticamente residuos en la cavidad del molde tras ser quemadas.

También deben ser fácilmente manipulables, eligiendo para cada caso la forma y dureza adecuadas. Es importante obtener un modelo de cera lo más perfecto posible, para reducir el trabajo de acabado de la pieza fundida al mínimo imprescindible.

Las ceras que se utilizan provienen de tres fuentes principales:

- **Insectos y animales:** Cera de abejas, de grasa de ballena o de la grasa proveniente de la lana.
- **Petróleo y minerales:** Provenientes de la ozoquerita (carbón bituminoso), parafina o vaselinas.

- **Vegetales:** Provenientes de bayas, de recubrimiento del fruto del sumac (árbol que crece en Japón) o de la candelilla (arbusto originario de México).[5]

3.6.1 Contracción:

En toda fundición, al comparar el modelo original (sea del material que sea), con la pieza fundida final obtenida, se observa que la pieza real se ve reducida dimensionalmente. El metal fundido, al solidificarse, se contrae.

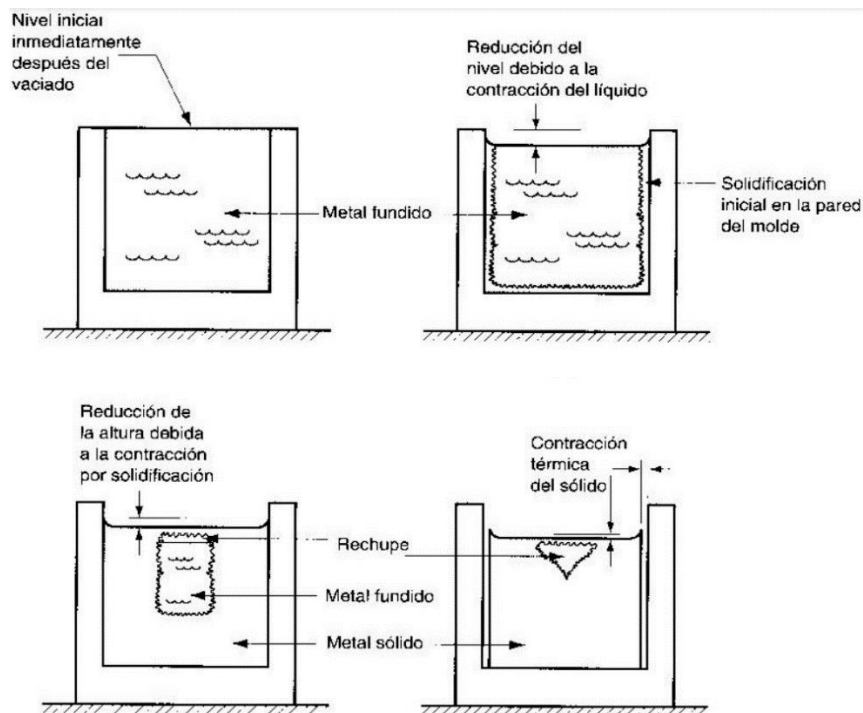


Figura 9. Fenómeno de contracción en la fundición. Fuente: [2]

Como vemos en la Figura 9, la contracción, además de disminuir el volumen de la pieza estimado, también trae otros problemas derivados, como, por ejemplo, los rechupes. Un rechupe no es más que un vacío/hueco que aparece en un modelo debido a un enfriamiento desigual, siendo el rechupe la última zona que solidifica.

La solución al problema dimensional ocasionado por la contracción es sencilla, sobredimensionar el modelo inicial. Este sobredimensionamiento compensará la contracción, y se obtendrá un producto final con las medidas deseadas.

En la tabla 5, vemos algunos valores estimados del grado de contracción según el tipo de material utilizado.[2]

Tabla 5. Porcentajes de contracción según material. Fuente: [3]

Metal/Aleación	% Contracción	Metal/Aleación	% Contracción
Aceros no aleados	5-7%	Cobre	4-5%
Aceros muy aleados	8-10%	Aluminio	5-7%
Fundición gris	3-5%	Aleaciones ligeras	5-8%
Fundición blanca	6-7%	Aleaciones de Mg	4-5%
Fundición nodular	4-5%	Níquel	5-6%
Bronces de Sn	5-7%	Cuproníquel	5-5,5%
Bronces de Al	4-5,5%	Cinc	4-4,5%
Latones	6-7%		

El modelo de la contracción se puede estudiar de una fórmula matemática aproximada:

El proceso de solidificación en las aleaciones fundidas ocurre en tres etapas: [7]

- 1) Contracción del metal en estado líquido.

$$\Delta V_1 = \beta_1 * V_1 * \Delta T_{sup} \quad \text{Ecuación 3}$$

- 2) Contracción del metal en la etapa de solidificación.

$$\Delta V = \epsilon V_1 * (T_{liq} - T_{sol}) \quad \text{Ecuación 4}$$

- 3) Contracción del metal en estado sólido.

$$\Delta V = \epsilon V_1 * (T_{liq} - T_A) \quad \text{Ecuación 5}$$

Tabla 6. Elementos de ecuaciones 3, 4 y 5. Fuente: [7]

β_1	Coficiente volumétrico de expansión del metal líquido, (1/K)
V_1	Volumen del molde, (m ³)
ΔT_{sup}	Sobrecalentamiento del metal, (°C)
T_A	Temperatura del ambiente, (°C)

Si la intensidad de enfriamiento es muy baja, y el gradiente de temperatura en la sección transversal de la pieza fundida es pequeño, la contracción del metal en estado sólido se reduce al mínimo.

La ϵ previa al término del volumen del molde (V_1) representa una magnitud de pequeño tamaño, ya que la variación volumétrica que se produce lo es.

Existen un grupo de factores que de una forma u otra intervienen en el proceso de la contracción o son causas de este, entre ellos están: el cambio en el volumen con la transformación de fase, los modos de solidificación de las aleaciones, las cavidades provocadas por la contracción y el proceso de la solidificación dirigida.

3.6.1.1 Criterios del modo de solidificación:

La naturaleza de la solidificación del metal depende del rango de temperatura de solidificación ΔTfr y de la caída de temperatura en la sección transversal de la pieza fundida $\delta_1 Tfr$.

- La condición de solidificación consecutiva del metal será:

$$\frac{\Delta Tfr}{\delta_1 * T} \ll 1 \quad \text{Ecuación 6}$$

Como vemos en la Ecuación 6, para que la solidificación sea consecutiva, el rango de temperatura ($T_L - T_S$) debe ser mucho más pequeña que la caída de temperatura en la sección de la pieza.[8]

3.7 Herramientas para modelar la cera

Las herramientas para crear modelos de cera son relativamente baratas, ya sea para modelos sencillos o complicados, en la tabla 7 podemos ver algunas de las utilizadas para este proceso.

Tabla 7. Herramientas utilizadas para modelar la cera. Fuente: [5]

Herramientas de corte	Bisturís, siendo los más adecuados los quirúrgicos
Herramientas de alisado	Limas para cera
Limpieza	Limpiadores de limas, esponjas.
Agujereador de cera	Cualquier herramienta puntiaguda, como agujas, fresas, taladros de mano
Herramientas para soldadura	Espátulas metálicas, herramientas eléctricas, lápices eléctricos.
Aplicación / Acabado	Pinceles, aplicación de calor, agua caliente, lijas...

3.8 El molde de caucho

La elaboración de un molde de caucho (puede ser de más materiales), es el elemento esencial para la reproducción de piezas utilizando la fundición a la cera perdida. A través de este molde se pueden reproducir miles de modelos de cera, que posteriormente se montarán en el árbol de fundición comentado anteriormente, repitiendo el proceso las veces necesarias.

A grandes rasgos, un molde de caucho se forma recubriendo de este material un prototipo totalmente acabado. Dicho molde se abre cortándolo cuidadosamente, separándolo del modelo original, a continuación, se juntan de nuevo las partes y se deja una abertura por la cual se inyecta la cera derretida para la obtención de los modelos.

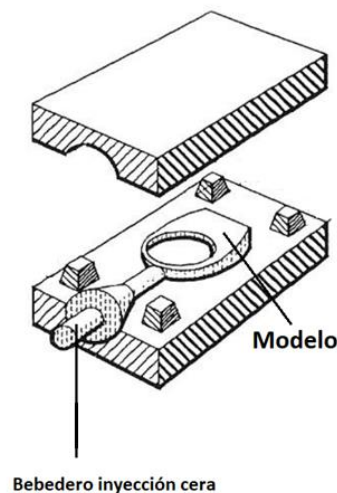


Figura 10. Molde de caucho. Fuente: [5]

En general, se utilizan tres materiales distintos para estos moldes (Tabla 8).

Tabla 8. Materiales para los moldes. Fuente: [5]

Goma con silicona	Alto coste, resisten la inyección de cinco a diez patrones antes de comenzar a deteriorarse
Caucho vulcanizado	Bajo coste, pero requiere una prensa cara. Resisten como mínimo hasta 135 °C. Capacidad de producir patrones hasta diez veces superior que la silicona.
Compuestos de colada calientes	Bajo coste en materiales y equipo. Proporcionan excelentes duplicados de patrones de cera perfectamente detallados. Son totalmente recuperables y pueden volver a utilizarse muchas veces.

3.9 Inyección de la cera

Antes de inyectar la cera fundida por el bebedero, una de las mitades del molde de caucho se espolvorea con talco, ya que esto ayudará a extraer el modelo de cera. Es importante destacar que la pulverización sobre el molde debe ser lo más ligera posible, para que no se pierda ningún detalle.

La cera fundida se enfría demasiado rápido como para permitir un flujo por gravedad. Con este método no conseguiríamos rellenar un molde profundo y mucho menos reproducir los pequeños detalles. Por ello, la cera se inyecta con una máquina inyectora de cera o con una máquina centrífuga.

El método centrífugo, reproduce detalles más finos y se controla mejor, pero rara vez es utilizado por los fabricantes debido a su gran lentitud.

Las condiciones de inyección de la cera en el molde se aproximan a una presión de 0,2-1 kgf/cm² y a una temperatura comprendida entre 60 y 74 °C, todos estos valores en función del molde a llenar.

3.9.1 Extracción del patrón de cera

La cera debe separarse del molde justo al endurecer. Si el molde se abre antes de tiempo, la cera se desgarrará. Por el contrario, si se abre demasiado tarde, la cera quedará en un estado quebradizo y se romperá.

Si aparecen rebabas en la cera, podrán ser retiradas con un bisturí, sin retirar la mitad inferior del molde. Obviamente, si ambas partes se acoplan a la perfección, la aparición de rebabas no debería suceder, por lo tanto, de aparecer, será debido a que el molde se encuentra mal en condiciones y deberá ser sustituido por uno nuevo.



3.9.2 Contracción de la cera

La contracción en la cera es incluso mayor que en las aleaciones metálicas.

No sólo aparece una reducción de tamaño al realizar la inyección de cera en el molde, sino que también se reduce en 1 o 2% el tamaño al repasar y pulir la pieza.

La reducción global, desde que se crea el modelo original hasta la pieza final, puede llegar a ser del orden de un 10 al 15%, superando ampliamente a la contracción de una simple fundición.

3.10 Montaje de las ceras

En una producción que se repite muchas veces, es mucho más rentable utilizar un cilindro lo más grande posible y llenarlo con tantos modelos como se puedan acomodar para fundirlos a la vez. En general, se utilizan dos sistemas para montar varios modelos al mismo tiempo.

3.10.1 Montaje en acerico

En este montaje varios modelos se montan en una base común. Cada modelo tiene un bebedero propio que se conecta a la parte convexa de la base, en una posición vertical.

Los modelos se espacian tan regularmente como sea posible, soldándolos a la base con una espátula eléctrica o una herramienta similar.

La introducción del metal fundido se realiza invirtiendo el conjunto, vertiendo el metal en la cavidad que veremos cóncava. Posteriormente, se elimina el revestimiento y se obtendrán los modelos a falta de la operación de acabado.

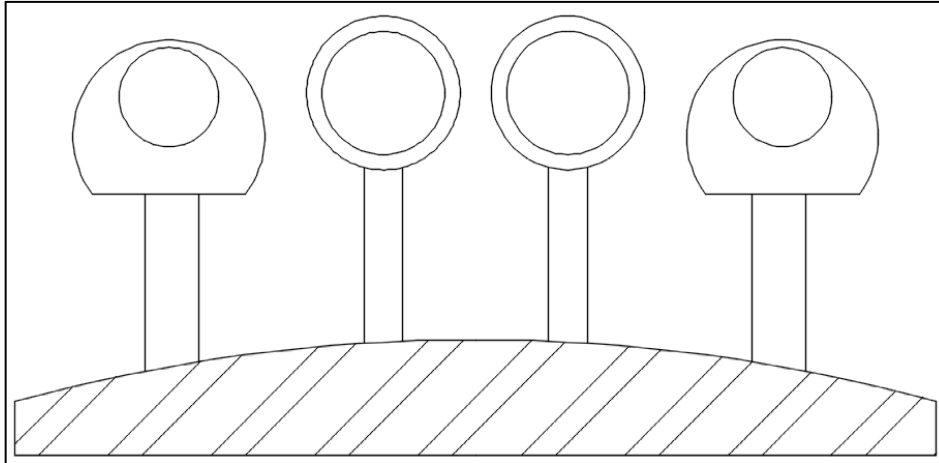


Figura 11. Montaje en acerico. Fuente: Elaboración propia.

3.10.2 Montaje en árbol

Este sistema se caracteriza por la adhesión de muchos modelos a un cilindro de cera central, colocado verticalmente dentro del cilindro de fundición. Esta unión se realiza a través de su bebedero. El perfil transversal del bebedero de cada patrón de cera debe contactar totalmente con el bebedero central, para que la apertura por la cual fluirá el metal fundido sea máxima.

Es importante conocer que los patrones deben quedar colocados en ángulo contrario a la base, ya que de esta forma la cera se elimina de una manera más sencilla en su quemado, y el metal fundido fluirá más suavemente llenando todas las cavidades del molde.

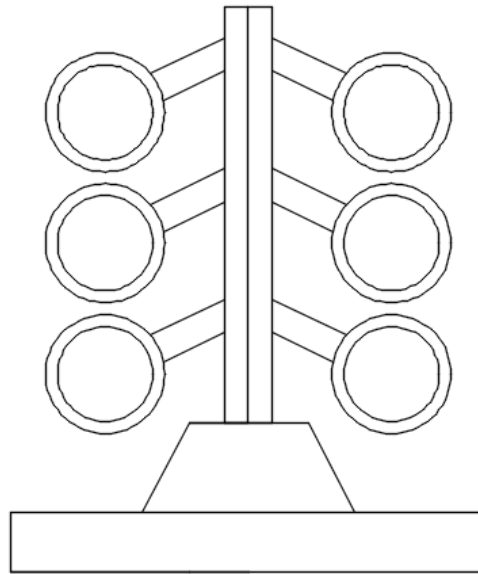


Figura 12.. Montaje en árbol con modelos hacia la base. Fuente: Elaboración propia.

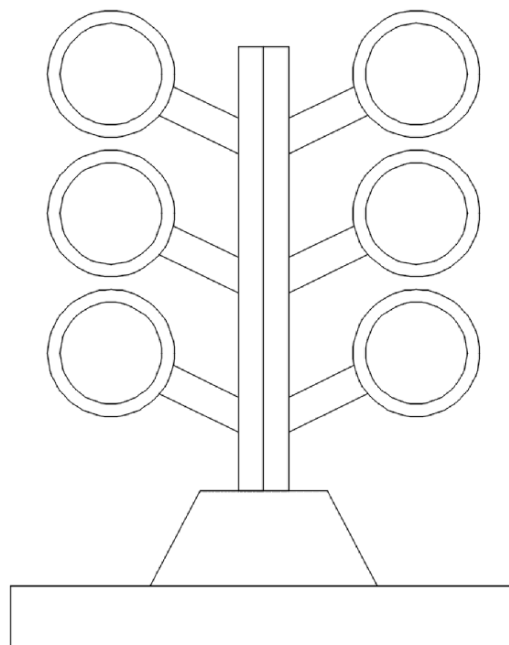


Figura 13. Montaje en árbol con modelos orientados correctamente. Fuente: Elaboración propia.

Un método de ayuda en este proceso es colocar una bola de cera en la parte superior del árbol. Dicha bola reunirá gran parte del fundente y de otros restos presentes en la fundición (Figura 14).

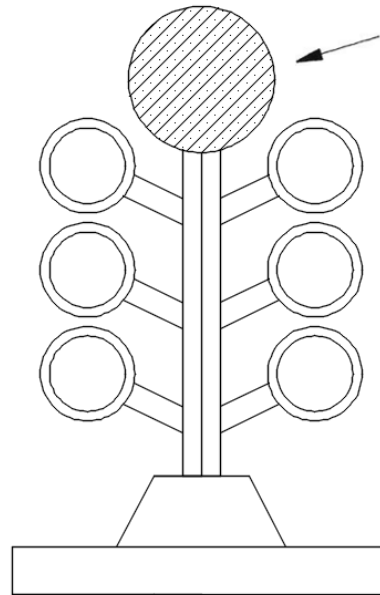


Figura 14. Colector de fundente e impurezas. Fuente: Elaboración propia.

3.11 Metal necesario para cada fundición

Es de gran importancia realizar el pesado de todos los bebederos con sus modelos de cera antes de llevar a cabo su conexión a la base, ya que este peso determinará la cantidad de metal que se debe preparar para la fundición.

3.11.1 Determinación a través del volumen

La base de cálculo para este peso del metal será la densidad de la aleación. Con este dato, sumado al volumen de cera de modelos y bebederos, el cálculo de metal fundido queda reducido a una simple multiplicación.

A modo de ejemplo, vamos a utilizar como metal fundido una aleación de oro amarillo de 18 quilates.



Tabla 9. Densidad del oro amarillo de 18 quilates. Fuente: [5]

Oro amarillo 18 quilates	Densidad 15,28 g/cm ³
--------------------------	-------------------------------------

Nuestros modelos de cera con sus bebederos nos aportan un volumen de 28 cm³, por lo tanto, el peso de oro amarillo necesario será:

$$\text{Volumen cera} * \text{Densidad de aleación} = \text{Masa aleación}$$

$$28 \text{ cm}^3 * 15,28 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 427,84\text{g} \quad \text{Ecuación 7}$$

3.11.2 Determinación por volumen de agua desplazado

Otra forma de realizar este cálculo es realizar una determinación a partir del volumen de agua desplazada al sumergir en agua los modelos de cera con sus bebederos, previamente introducidos en una probeta graduada.

Seguidamente se introduce aleación del mismo tipo que se va a fundir, en una probeta preparada exactamente igual que la anterior, hasta que el agua se nivele con la primera.

3.11.3 Botón metálico o mazarota

En ambas determinaciones anteriores, se añade de un 20-25% de material fundido extra, ya que hay una parte de metal sobrante en la cavidad de alimentación, llamado botón metálico o mazarota.

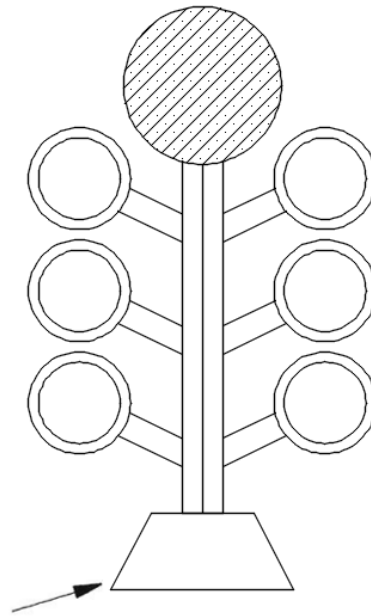


Figura 15. Botón metálico o mazarota. Fuente: Elaboración propia.

Este botón/mazarota es necesario, ya que, al estar en estado líquido, realiza presión sobre el metal introducido en el molde, obligándolo a llenar todas las cavidades.

Tarda más en solidificar debido a sus mayores dimensiones, por lo tanto, al mantener su estado líquido, nos permite compensar las contracciones que tienen lugar durante la solidificación, ya que podemos seguir alimentando de metal al molde.

3.12 Bases de bebedero

Pueden utilizarse o no, pero tienen como finalidad:

- Mantener los modelos fijos de la forma deseada.
- Facilitar y guiar a la cera cuando sale del molde en su quemado.
- Facilitar el paso del metal fundido, ya que su cavidad actúa similar a un embudo.
- Actuar como prevención contra la contracción del metal fundido.

El diámetro de las bases, como es entendible, debe coincidir con el cilindro asociado que vamos a utilizar.

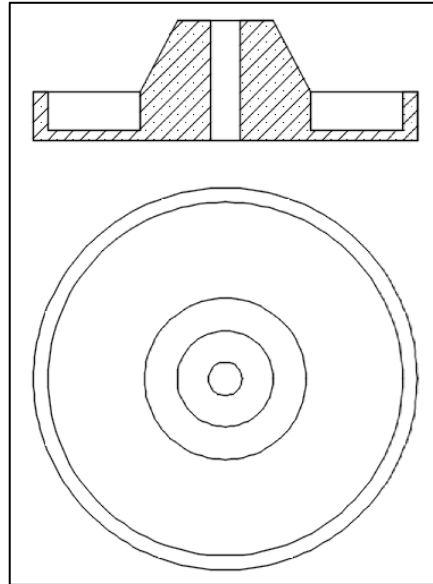


Figura 16. Base con agujero central. Fuente: Elaboración propia.

Normalmente, se utilizan bases con un agujero central, ya que así se utiliza esta cavidad para el llenado con cera.

Sin embargo, se pueden usar bases sin agujero, en las que se debe preparar anteriormente su forma convexa interior con una capa de cera fundida conectada a los bebederos.

3.13 Cilindros de fundición

Los cilindros se encajan en la hendidura correspondiente de la base, de forma que queda totalmente sellado. Si la base está defectuosa o desgastada, los huecos pueden taponarse con arcilla o con cera fundida.

3.13.1 Materiales de los cilindros

Los cilindros suelen estar fabricados de acero al carbono o acero inoxidable. Es preferible utilizar el acero inoxidable, aunque sea más caro, proporciona una mayor duración y es capaz de soportar temperaturas más elevadas.



3.13.2 Dimensiones de los cilindros

Sus dimensiones no están normalizadas, dependiendo del tipo de proceso se utilizará de un tamaño u otro. Para piezas en serie, es recomendable utilizar lo más grande posible para reducir el número de operaciones.

3.13.3 Holgura entre el cilindro y los modelos

Es importante tener en cuenta que, al elegir nuestro cilindro en función de nuestros modelos, debe quedar un espacio lateral para que exista una cantidad suficiente de revestimiento que pueda soportar la presión del metal fundido. El espesor debe ser, como mínimo:

6,5 mm para cilindros pequeños, 13 mm para normales y 25 mm para grandes.

3.14 Revestimiento

Como su propio nombre indica, el revestimiento rodea al molde de forma completa, tanto al patrón de cera como al de metal fundido.

Este revestimiento solo puede ser utilizado una vez, ya que es necesario eliminarlo para obtener los modelos finales del metal fundido solidificado.

En la tabla 10 se enuncian unas consideraciones generales sobre los revestimientos:

Tabla 10. Consideraciones generales sobre revestimientos. Fuente: [5]

Características básicas	Propiedades estables hasta los 760 °C. Porosidad suficiente para escape de gases. Conductividad térmica aceptable. Capacidad de soportar la presión del metal sin aparición de grietas o cascarillas.
Composición del revestimiento	Un aglutinante (por ejemplo, el yeso). Un refractario (por ejemplo, Sílice). Aditivos como agente modificante, reductor, humectante, antiespumante...(por ejemplo, ácido bórico).
Control de calidad	Ensayos sobre el tamaño de las partículas. Ensayos sobre la fluidez de la mezcla. Ensayos de resistencia a la compresión y temperatura.
Conservación	Ambiente seco para evitar la absorción de humedad.
Porcentaje de agua	En general, para el gran porcentaje de fundiciones, se utiliza un 40% de agua en proporción con el producto. El exceso de agua debilita la resistencia que tiene el revestimiento. Por el contrario, si hay un exceso de revestimiento, puede que el cilindro no se llene completamente al ser demasiado espeso.

3.14.1 Tiempo de trabajo

El tiempo de trabajo es un paso crítico a la hora de obtener una consistencia adecuada en el revestimiento. El tiempo útil es muy limitado, tras este, nuestro revestimiento fraguará. Dicho tiempo se estima aproximadamente como:

- Tres o cuatro minutos para mezclar el revestimiento.
- Dos o tres minutos para eliminar burbujas suspendidas en la mezcla.
- Treinta segundos para verter el revestimiento en el cilindro de fundición.
- Un minuto y treinta segundos para eliminar las burbujas que aparecen en el cilindro.

- Medio minuto para llenar el cilindro por completo de la mezcla.
- Un minuto y treinta segundos para que se asiente la mezcla.

En total, el tiempo útil del que se dispone está comprendido entre los 9-10 minutos, a partir de los cuales se producirá el endurecimiento del revestimiento.

Si utilizamos menos tiempo, puede que el agua se separe del revestimiento. Por el contrario, si tardamos más tiempo del necesario, la mezcla se endurecerá antes de lo esperado y no conseguiremos cubrir los patrones de cera.

3.15 Quemado

El quemado tiene como finalidad eliminar tanto la cera como la humedad dentro del cilindro sin estropear el revestimiento. Al contrario, este quemado prepara al revestimiento, ya que disminuye el choque térmico que se va a producir al introducir el metal fundido.

El proceso es tan simple como introducir el cilindro de fundición, ya con el revestimiento y la cera en su interior, en un horno. El cilindro se introduce a temperatura ambiente, y la temperatura va aumentando progresivamente hasta alcanzar la temperatura objetivo, en la que se estabilizará el tiempo deseado para eliminar totalmente tanto la cera como los gases.

En esta operación se pueden introducir varios cilindros a la vez, variando la posición de estos en el horno dependiendo de la temperatura que necesiten.

Este quemado debe producirse antes de que el revestimiento se haya secado (no confundir con haber fraguado), ya que, si el revestimiento no está húmedo, tenderá a resquebrajarse y puede absorber cera mediante sus poros.

En general, la temperatura máxima en la que el revestimiento mantiene sus propiedades es aproximadamente de 760 °C. Las temperaturas de fusión de las aleaciones más comunes oscilan entre 590 y 370 °C, por lo que existe margen de seguridad.



3.15.1 Quemado de modelos que no son de cera

Es recomendable aumentar la dimensión de estos modelos mediante un pintado, un recubrimiento de cera fundida, o pulverizándolos con laca o plástico.

Para asegurar un quemado total, la temperatura debería alcanzar los 800 °C para ciertos materiales, por lo que se debería utilizar un revestimiento con características algo superiores.

Hay que tener en cuenta que la mayoría de los plásticos desprenden sustancias tóxicas en su quemado, por lo que el horno debe estar bien ventilado para evitar su inhalación.

3.16 Aleaciones

Un mínimo de 50% o superior del metal que se utilizará para la fundición debe ser metal nuevo, si se utiliza más del 50% de un metal reutilizado el resultado será una fundición porosa.

En este tipo de fundición, de forma estimada, un 60% del metal fundido va hacia los modelos y un 40% se reparte entre bebederos y botones.

3.17 Fundición

No se deben dejar enfriar los cilindros tras su proceso de quemado, ya que, si se produce este enfriamiento, el molde adquirirá cierta humedad, y al verter el metal fundido será más probable que la superficie albergue poros.

La fundición del metal, si no se produce directamente en el crisol, mediante un soplete o una herramienta similar, se produce en un horno separado.

Es preferible utilizar un horno a gas frente a uno eléctrico, ya que, además de ser más barato y sencillo de manejar, también funden el metal más rápido.

3.17.1 Crisoles

Un crisol es el recipiente utilizado para albergar al metal fundido. Está fabricado de materiales muy refractarios, para resistir las altas temperaturas a las que están sometidos.

La mayoría de los crisoles tienen forma cónica, a la que se le puede añadir un pico en la parte superior para facilitar el vertido del metal fundido.

Si es posible, se recomienda trabajar con un tamaño de crisol lo más pequeño posible, ya que la dispersión de calor será menor que en uno de mayor tamaño.



Figura 17. Crisoles. Fuente: Elaboración propia

3.18 Eliminación del revestimiento y enfriado

El siguiente paso consiste en dejar enfriar al cilindro con el metal fundido en su interior. En el proceso de enfriamiento, se eliminará el revestimiento.

Al introducir el cilindro en agua, el choque térmico produce una reacción en el revestimiento, que induce a su desintegración, lo que permite separar las piezas fundidas.

Hay otras formas de eliminar el revestimiento, inyectando agua a presión, con un chorro de vapor, por ultrasonidos..., etc.

Los restos de revestimiento se pueden eliminar simplemente con un cepillo, pero los restos que aun así persisten se eliminan con un decapado (tratamiento superficial realizado a metales), un chorro de arena o con ultrasonidos.



3.19 Operaciones de acabado

Al eliminar el revestimiento, se deben realizar las modificaciones necesarias para obtener los modelos finales.

Se elimina el botón y cada uno de los bebederos con una cizalla adecuada, lo más cerca posible del modelo final, para acabar el material sobrante en una limadora rotativa o con una muela de esmeril.

Si es necesario y la pieza final lo requiere, se puede realizar un pulido de su superficie, utilizando para ello un motor de pulir corriente, con ruedas y abrasivos apropiados a cada material.

3.20 Defectos de fundición

En general, todas las fundiciones tienen unos defectos asociados en común. Los más normales son los siguientes:

- **Porosidad:** Es el defecto más común. Provocado por la existencia de gases o por partículas mezcladas del revestimiento. Alimentación inadecuada de colada, quemado incompleto del revestimiento, calentamiento rápido de revestimiento, composición inadecuada de aleación, etc.
- **Superficies rugosas y rebabas:** Provocado por demasiada humedad en el revestimiento, suciedades, revestimiento mal mezclado, metal muy caliente, etc.
- **Piezas picadas:** Provocado por metal mal fundido o sucio, bebederos demasiado grandes o pequeños, metal oxidado, etc.
- **Burbujas de metal en la fundición:** Provocado por ausencia de eliminación de burbujas en revestimiento, aire o gotas de agua durante el pintado del modelo.
- **Piezas fundidas oxidadas:** Provocado por eliminación incompleta de cera, metal sobrecalentado en el crisol u horno.
- **Piezas fundidas incompletas:** Provocado por bebederos muy pequeños, bebederos insuficientes para la geometría del modelo, presión de inyección insuficiente, cálculo defectuoso de metal fundido, etc.



- **Grietas:** Provocado por el enfriado del cilindro a alta temperatura (las piezas interiores sufren un gran choque térmico) o por un metal fundido con gran tamaño de grano (desgarro en el borde de grano al producirse la contracción).[5]



CAPÍTULO 4. DISEÑO E IMPRESIÓN DE LOS MODELOS

4.1 Introducción

La continuación del trabajo de fin de grado consistirá en el diseño de los modelos en un software de modelado 3D y su posterior impresión en 3D, utilizando como material, en primera instancia, el poliestireno de alto impacto (más conocido como HIPS, *High Impact Polystyrene*).

Posteriormente, se realizaron modelos con un nuevo filamento similar a la cera llamado MoldLay y, finalmente, también con un nuevo filamento llamado Polycast.

Esta parte suprimirá el proceso de preparar un modelo mediante mecanizado o a mano (en el caso de una fundición normal) y evitará crear un modelo de cera inicial para conseguir un molde de caucho o silicona específico para la pieza que se quiere obtener, ya que al imprimir el modelo en 3D, directamente se unirá al cilindro central de cera en el que se montan normalmente los modelos (formando el árbol de fundición). Después de estos pasos, el proceso de obtención de la pieza final es el mismo que el convencional.

4.1.1 Modelaje en 3D

Para poder imprimir un modelo en tres dimensiones, el primer paso es diseñar ese modelo en uno de los programas de diseño que existen en el mercado.

El programa elegido será el CATIA, en concreto su versión 5, producida por primera vez en 1999, y que ha recibido actualizaciones hasta el día de hoy debido a su buen funcionamiento.

Este software se describe como una plataforma de desarrollo de productos, adaptada a las herramientas y procesos actuales, que nos ofrece una experiencia muy intuitiva con diversas funcionalidades, como, por ejemplo, las que vamos a utilizar, el modelado, la creación del plano del modelo y la conversión de este archivo para poder imprimirlo en 3D.[9]

4.1.2 La impresión 3D

Mediante la impresión 3D se crean objetos al depositar material por capas. Sus inicios datan de principios de los años ochenta, pero inicialmente era una técnica muy lenta y de un coste muy elevado. Hoy en día, cualquier persona puede tener una impresora 3D en su casa, siendo el procesado es más rápido que nunca, permitiendo la creación propia de objetos prácticos para el hogar.

La forma de impresión es muy sencilla, cada capa corresponde a la forma en dos dimensiones de un elemento diferencial del modelo final. Una pirámide impresa en 3D comenzará como un simple cuadrado y terminará con un pequeño punto. El espesor de cada capa depende de los parámetros de impresión que se le indique al programa y del espesor del material que utilizemos.

Los continuos avances han permitido la reproducción de diseños tan complejos que serían imposibles de realizar de otra forma, como, por ejemplo, con el mecanizado. También han generado ventajas respecto a ciertos procesos, aunque la impresión del objeto 3D puede tardar bastante, sigue siendo mucho más rápida que un moldeo por inyección, lo que hace al proceso prácticamente sustituible.

Con esta tecnología se puede trabajar con materiales muy diversos (los más comunes son los plásticos, desde el PLA hasta polímeros muy avanzados). Además, su almacenamiento es mucho más barato y ocupa mucho menos espacio. Si nuestra impresora trabaja con filamentos, simplemente tendremos en nuestro almacén bobinas del material requerido.[10]

Hoy en día, en cuanto a la impresión 3D, se distinguen fundamentalmente tres tipos de técnicas:

- **Modelado por deposición fundida (FDM):** Este sistema es el más común a la hora de realizar las impresiones en 3D, ya que estas impresoras son más baratas que las de otros métodos, y, a su vez, los materiales también son más baratos y diversos. La impresora calienta al polímero que se encuentra enrollado en una bobina hasta que lo funde. A partir de aquí, lo extruye mediante una boquilla, formando un hilo muy fino que se deposita en la base de impresión de la impresora, creando así la geometría de la pieza al montar capa sobre capa.[11]

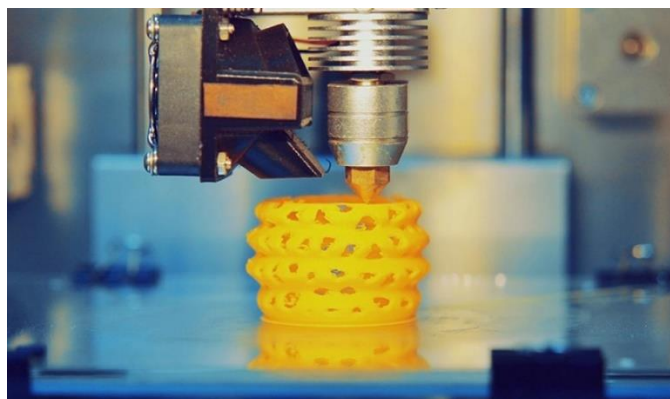


Figura 18. FDM. Fuente: [11]

- **Sinterizado selectivo por láser (SLS):** Es un método bastante común en la industria, capaz de fabricar con múltiples materiales, desde polímeros hasta metales. Utiliza la temperatura generada por un rayo láser CO_2 para realizar la impresión capa por capa a partir de polvos fusionados. El proceso consiste en una plataforma de construcción que se va rellenando de material, posteriormente el láser realiza la primera capa y la base se mueve hacia abajo, se vuelve a rellenar de material y se realiza la siguiente capa, así hasta que se finaliza la pieza completa. Este proceso tiene una pequeña vertiente, llamada sinterizado láser de metal. Esta vertiente se basa en el mismo proceso, con la diferencia de los materiales usados, ya que es utilizada para materiales más costosos como la plata o el oro, lo que permite una gran aplicación en ámbitos como la joyería.[12]

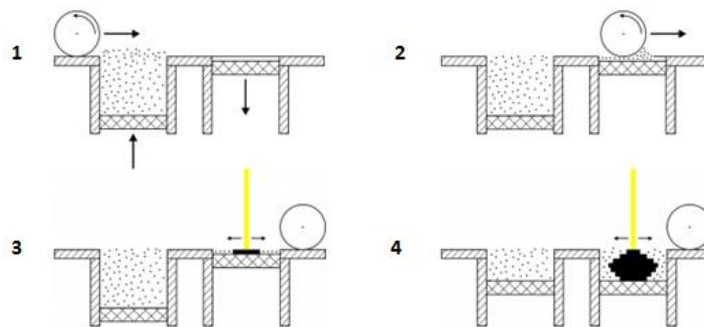


Figura 19. SLS. Fuente: [12]

- **Estereolitografía (SLA):** Este proceso utiliza el principio de fotopolimerización para crear modelos 3D a partir de resinas sensibles a los rayos ultravioleta. El proceso es igual al SLS, pero con la diferencia que en la estereolitografía el rayo es ultravioleta. Como inconveniente se encuentra un pequeño volumen de producción y la necesidad de usar diversos químicos tanto para el curado como la limpieza de las piezas, lo que hace que se necesite mascarilla y buena ventilación como prevención.[13]

4.2 Elección del material

Continuando una línea de trabajo realizada anteriormente, en la que en la impresión 3D se utilizaba un filamento de PLA, se buscaba mejorar los resultados obtenidos con dicho filamento partiendo de un material de características similares.

Además, se pretendía encontrar un material que fuera algo menos agresivo para la fundición, ya que con el PLA aparecen bastantes problemas relacionados con los humos y el vertido del caldo. Por ello, se valoró la idea de trabajar con un material similar al poliestireno común, ya que es un material que se entendió que daría menos problemas, pero era necesario el poder obtenerlo en forma de filamento de impresión, a raíz de esto se eligió el poliestireno de alto impacto.

El HIPS es un material que tiene características superiores a las de otros plásticos, destacando en su resistencia a los impactos y su gran procesabilidad, ya que se puede procesar con métodos utilizados para termoplásticos, como la inyección y la extrusión.[14]



Figura 20. Bobina de HIPS. Fuente: [15]

La obtención de este material se consigue simplemente añadiendo del 5 al 10% de polibutadieno a la cadena normal del estireno. Más de la mitad del poliestireno que se produce acaba convirtiéndose en este material.[16]

4.3 Diseño del modelo

Antes de plantearse la geometría del modelo, se decidió realizar una pieza de dimensiones pequeñas, para no tener un gran desperdicio de material si había fallos en el proceso y para que el quemado que se produce para dejar el molde vacío fuese lo más completo posible.

Otro factor limitante, era crear un diseño que entrase en uno de los cilindros de fundición de los que disponíamos en el taller, ya que el objetivo era utilizar la técnica de la cera perdida como el proceso de fundición.

La elección fue un cilindro cuyo diámetro interior era de 66mm, por lo que la pieza debería ser capaz de entrar en ese volumen interior.

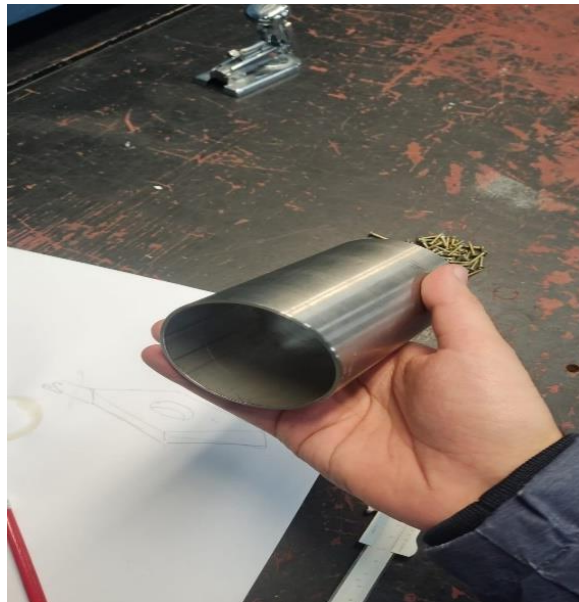


Figura 21. Cilindro de fundición 66mm. Fuente: Elaboración propia

4.3.1 Primer modelo

La fundición a la cera perdida es utilizada en su mayoría para la creación de joyas, por lo que, en un principio, el primer modelo pensado adoptó una forma similar a un anillo (Figura 22).

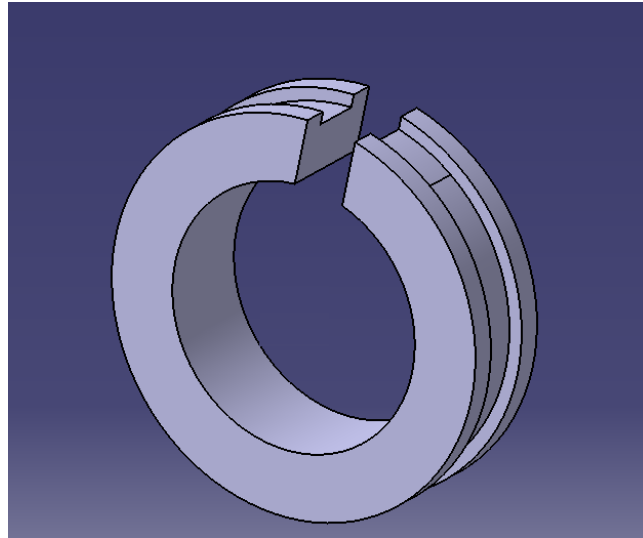


Figura 22. Primer modelo diseñado. Fuente: Elaboración propia.

Este modelo fue descartado por tener pocos elementos medibles, por lo que se optó por diseñar un modelo con más variación de dimensiones, un cilindro con dos diámetros, dos longitudes y una ranura, para luego poder verificar todas estas dimensiones (Figura 23).

4.3.2 Segundo modelo

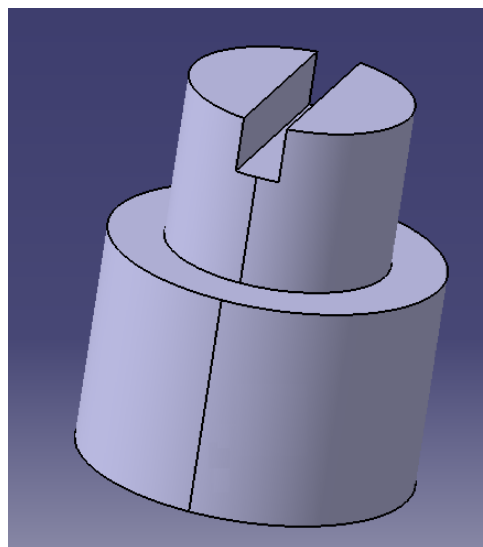


Figura 23. Segundo modelo diseñado. Fuente: Elaboración propia.

Este modelo es más sencillo de imprimir por su geometría. Además, el cilindro es macizo (figura 24) para facilitar la impresión en 3D (cuantas menos oquedades existan mejor será la impresión).

Las medidas que se obtengan tras la impresión 3D son muy importantes, ya que se van a realizar mediciones para comparar las dimensiones obtenidas mediante el proceso de fundición, usando como modelo la pieza impresa en 3D, con la pieza ideal, ya que eso se pretende conseguir con este trabajo, ser capaces de sustituir los modelos convencionales con los impresos en 3D.

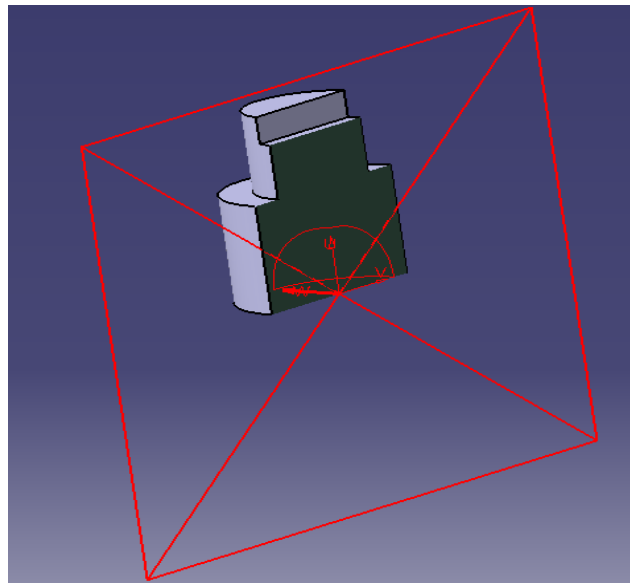
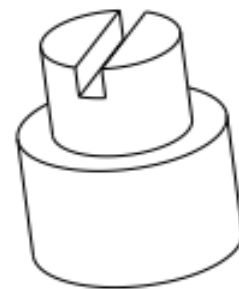
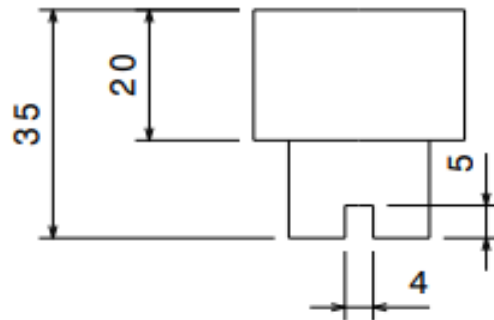
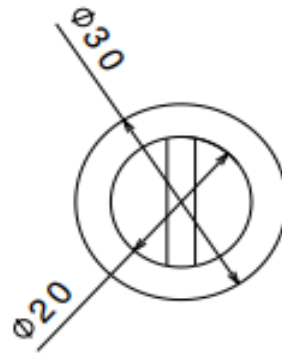


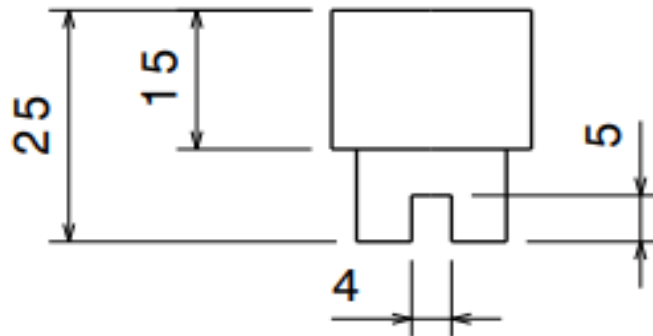
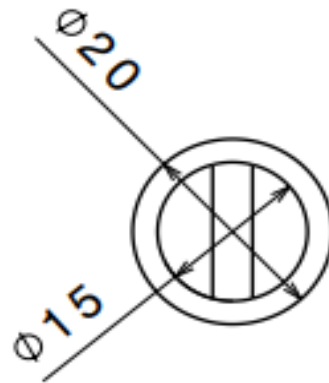
Figura 24. Imagen del modelo sólido. Fuente: Elaboración propia.

Como se comentó antes, el cilindro de fundición elegido es un factor limitante, por lo tanto, las dimensiones mayores de este segundo modelo serán de 35 mm de longitud * 20 mm de diámetro, por lo que se podía introducir perfectamente dentro del cilindro.

A su vez, se escaló dicho cilindro para comprobar la viabilidad del proceso con distintos tamaños. El nuevo cilindro contaba como dimensiones mayores 20 mm de diámetro * 25 mm de longitud. En las siguientes páginas podemos ver los planos de ambos cilindros.



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
AUTOR	22/04/2023	REOYO BENITO, MARCOS	
COMPROBADO	22/04/2023	SANTOS MARTÍN, FRANCISCO JAVIER	
ESCALA 1:1	MODELO 2 - CILINDRO		N ° DE PLANO : 1
			N ° DE PÁGINA : 1



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
AUTOR	25/04/2023	REYO BENITO, MARCOS	
COMPROBADO	25/04/2023	SANTOS MARTÍN, FRANCISCO JAVIER	
ESCALA	MODELO 2 - CILINDRO REDUCIDO		N ° DE PLANO : 2
1 : 1			N ° DE PÁGINA : 1



4.4 Conversión del modelo

Una vez diseñado el modelo, el propio software CATIA permite su conversión a un archivo reconocible por los programas de impresión 3D, dicha extensión es el STL (Stereolithography- Estereolitografía).

Esta conversión se hace rápidamente, lo que es una ventaja de gran importancia, evitando el diseño de un modelo en un software de impresión 3D.

4.5 Impresión del modelo en 3D

4.5.1 Software utilizado

Para poder realizar una impresión en 3D, necesitamos un software capaz de analizar un modelo 3D para su posterior impresión teniendo una gran versatilidad en cuanto a los parámetros que necesitamos.

El software que se va a utilizar es el CURA, desarrollado por David Braam en 2014 y adquirido posteriormente por la empresa Ultimaker.

Este software tiene una gran ventaja, es de código abierto, por lo que mantiene una constante evolución. Además, es compatible con los sistemas operativos más comunes, está traducido a más de 15 idiomas, las impresoras de otros fabricantes también pueden utilizarlo...etc. Gracias a todo esto, CURA es el software más utilizado a nivel mundial en cuanto a la fabricación aditiva.

Los parámetros a la hora de la impresión con CURA son totalmente personalizables, aun así, contiene unos parámetros establecidos para los filamentos más comunes, ofreciéndonos condiciones óptimas sin tener que realizar su búsqueda.[17]

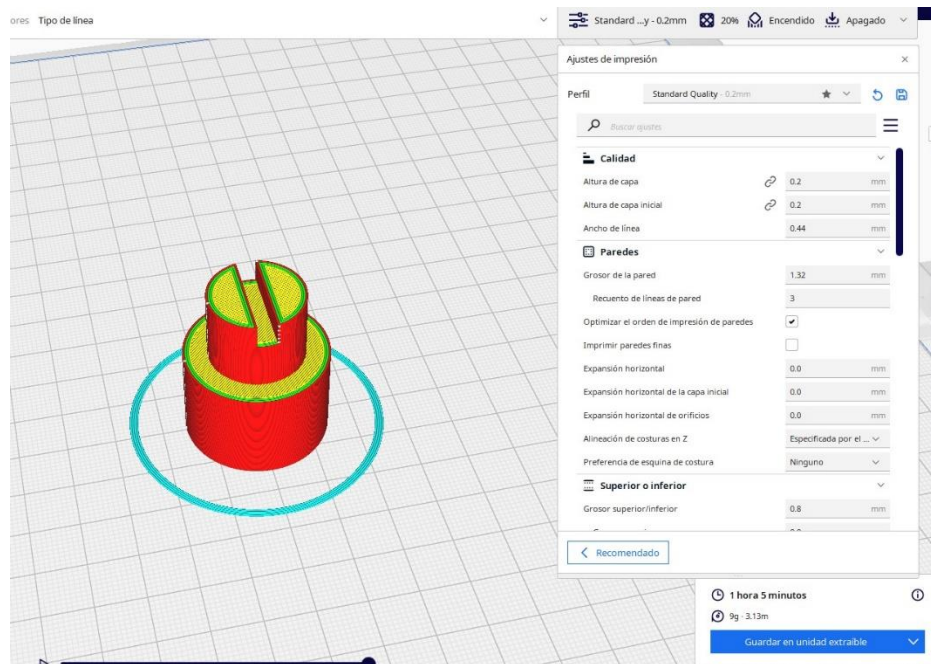


Figura 25. Software CURA. Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 Impresoras 3D utilizadas

Como se ha comentado anteriormente, las impresoras 3D que trabajan con deposición fundida utilizan polímeros en forma de filamentos enrollados en bobinas. Estos filamentos, están divididos comúnmente en dos medidas, 2,85 mm y 1,75 mm. La mayoría de las impresoras se especializan en una de las dos medidas, pero existen algunas que aceptan de los dos tipos.

Cada diámetro de filamento tiene sus ventajas e inconvenientes, pero, en general, se requiere menos energía para extruir el filamento más grande, como se va a explicar en el siguiente ejemplo:

Para desplazar el filamento hacia el extrusor se requiere un piñón, el cual girará N vueltas desplazando cierto volumen de plástico en cada una de ellas.

Suponemos un piñón de radio $r=8$ mm, que girará $N=5$ vueltas para un diámetro inicial de filamento de 1,75 mm.

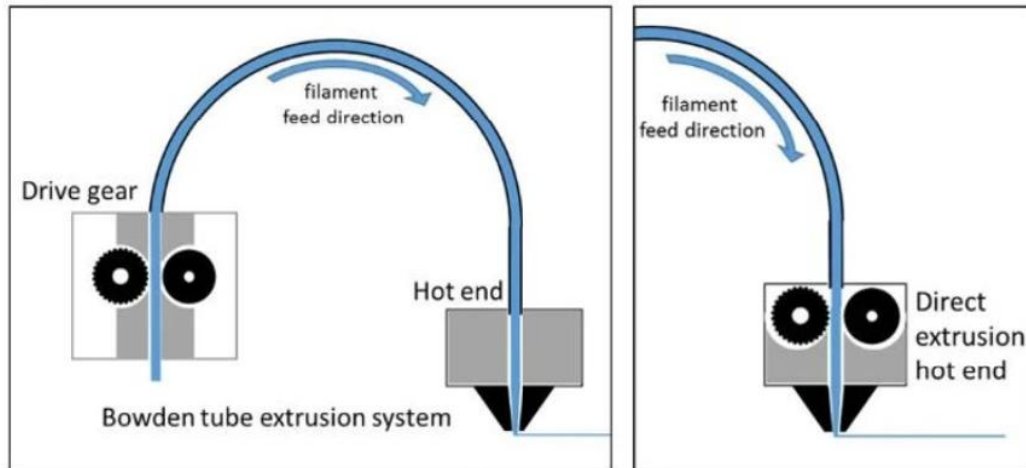


Figura 26. Extrusión filamento. Fuente: [18].

El avance del filamento obedece la siguiente expresión:

$$\text{Avance del filamento } (Av) = \text{Número de vueltas } (N) * \text{Perímetro del piñón } (Pp) \quad \text{Ecuación 8}$$

Sabiendo que:

$$Pp = 2\pi r \quad \text{Ecuación 9}$$

Entonces:

$$Av = N * 2\pi r = 5 * 2 * \pi * 8 \text{ mm} = 251,38 \text{ mm} \quad \text{Ecuación 10}$$

Por lo tanto, el volumen de plástico desplazado será:

$$\text{Volumen de plástico desplazado } (V) = \text{Área filamento } (A) * Av \quad \text{Ecuación 11}$$

$$V_{1,75\text{mm}} = \pi * r^2 * Av \quad \text{Ecuación 12}$$

$$V_{1,75\text{mm}} = 604,64 \text{ mm}^3 \quad \text{Ecuación 13}$$

Como vemos, para un filamento de 1,75 mm, con 5 vueltas se podrán desplazar 604,25 mm³ de filamento.

Se realiza el proceso a la inversa, para obtener el número de vueltas necesario para desplazar esos 604,64 mm³ para el filamento de 2,85 mm, por lo tanto:

$$Av_{2,85\text{mm}} = \frac{V_{1,75\text{mm}}}{A_{2,85\text{mm}}} = 94,78\text{mm} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$N_{2,85\text{mm}} = \frac{Av_{2,85\text{mm}}}{Pp} = 1,88 \text{ vueltas} \quad \text{Ecuación 15}$$

Por lo tanto, el piñón dará 3 vueltas completas menos para un filamento de 2,85 mm, por ello, el ahorro de energía en impresiones de larga duración es notorio, y se evitan grandes sobrecalentamientos de los motores debido a la

gran cantidad de movimientos rápidos necesarios para extruir y retraer los filamentos.[18]

En cuanto a las impresoras utilizadas en el trabajo, en el taller de la universidad contamos con dos impresoras distintas:

El primer modelo que se va a utilizar para la impresión 3D es una BCN3D sigma 19 (Figura 28), utilizada para filamentos de diámetro 2,85 mm.

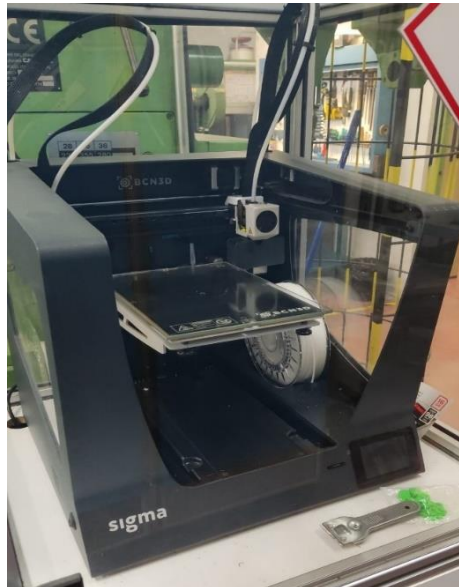


Figura 27. Impresora sigma bcn3d. Fuente: Elaboración propia.

Esta impresora fue lanzada en 2018 por BCN3D Technologies. Cuenta con dos bobinas para la extrusión, con hotends (fusores) y extrusores de la máxima calidad. Además, introdujeron un interruptor mecánico para detectar la presencia de filamento. Este era uno de los grandes problemas a la hora de la impresión 3D. Con este sensor, se consigue ahorrar tiempo y costes ya que se detendrá automáticamente si el usuario se queda sin filamento.[19]

El segundo modelo utilizado será una Creatily Ender 3 Pro, que se utiliza para filamentos de menor tamaño, en concreto de 1,75 mm (Figura 28).



Figura 28. Creality Ender 3 Pro. Fuente: Elaboración propia.

El tercer modelo utilizado es una impresora particular, también utilizada para filamentos de 1,75 mm, dicho modelo es la Ultimaker Artillery Sidewinder x2 (Figura 29), que destaca por su bajo coste y por tener extrusión directa, lo que evita giros bruscos en el filamento.

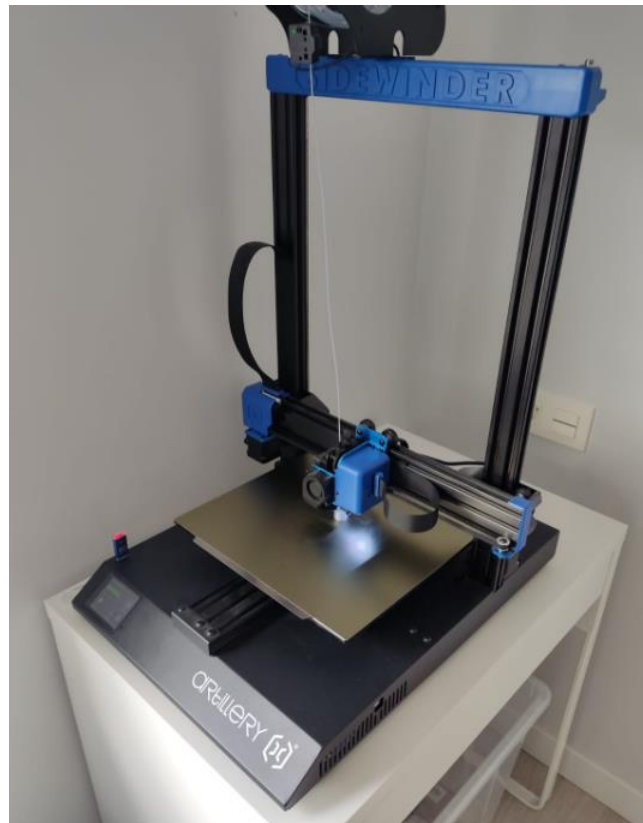


Figura 29. Impresora Artillery Sidewinter x2. Fuente: Elaboración propia.

4.5.3 Configuración de parámetros e impresión

Al crear un nuevo material en CURA, se pueden introducir tanto parámetros acerca de la información general del material, como parámetros relacionados únicamente con la impresión.

En función de las propiedades y recomendaciones acerca del poliestireno de alto impacto, se introducen los parámetros de las figuras 30 y 31 para que la impresión sea lo más precisa posible.

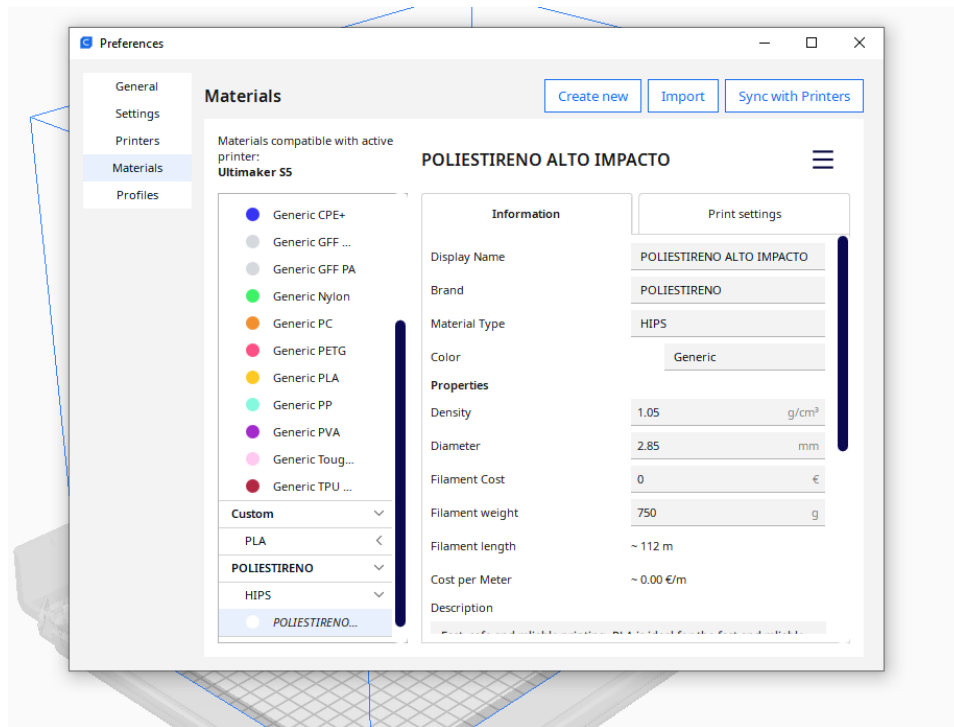


Figura 30. Parámetros CURA. Fuente: Elaboración propia.

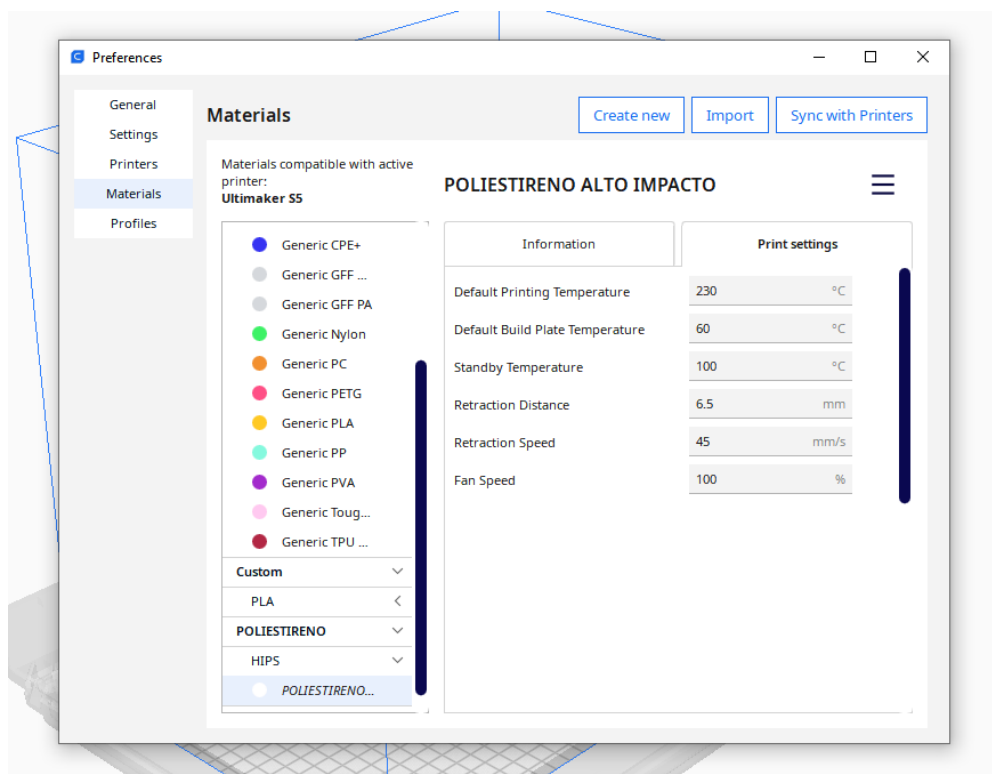


Figura 31. Parámetros CURA. Fuente: Elaboración propia.



Significado de los parámetros programados en el software CURA:

- Temperatura de impresión (“Printing Temperature”): Depende de cada material, es la temperatura de trabajo a la que imprimirá la impresora.
- Temperatura de cama (“Build plate Temperature”): Temperatura de cama. La cama es la superficie plana utilizada como área de impresión. En ella, está colocada una resistencia integrada, encargada de generar calor para que las piezas se puedan adherir con mayor facilidad.
- Temperatura de espera (“Standby Temperatura”): Temperatura a la que se quedará la impresora si hay que realizar un cambio de filamento.
- Distancia de retracción (“Retraction Distance”): Longitud del filamento que retraerá el extrusor en los movimientos de desplazamiento mientras la impresora no está imprimiendo (en vacío).
- Velocidad de retracción (“Retraction Speed”): Velocidad a la que se produce la retracción del filamento. Es importante que la retracción sea rápida, ya que así se evitan deposiciones de material en otras partes del modelo.
- Velocidad del ventilador (“Fan Speed”): Porcentaje de velocidad del giro del ventilador. Es importante controlar este parámetro si es necesario, ya que normalmente estos ventiladores refrigeran tanto al HotEnd (fusor) como al propio material.

Los parámetros que consideraremos de especial relevancia serán la temperatura de impresión y la temperatura de cama (230 y 60 °C respectivamente). Tras la configuración de los parámetros en el software, se procede a la impresión. La pieza obtenida es la que se puede observar en la Figura 32.

De forma visual se puede apreciar que el acabado conseguido con este material es muy bueno, apenas se aprecian las distintas capas depositadas en la impresión, lo que ayudará a la hora de obtener una pieza final óptima.



Figura 32. Modelo impreso con poliestireno de alto impacto. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente a la impresión en 3D de la pieza, se procede a medir sus dimensiones para comparar las medidas nominales con las reales.

Las dimensiones se medirán con un calibre 0-150 mm de la marca Mahr (Figura 33). El calibre ofrece una incertidumbre de medida de 0,0205 mm (acotado a 0,02 mm, ya que la incertidumbre se expresa con dos cifras significativas), registrado en su informe de calibración que se puede observar en el anexo 2.



Figura 33. Calibre digital 0-150 mm. Fuente: Elaboración propia.

La rugosidad de las piezas será medida con un rugosímetro de la marca Taylor-Hobson, cuya resolución alcanza los 0,01 micrómetros (Figura 34). La incertidumbre asociada a este instrumento será de 0,245 micrómetros (acotado a 0,24 micrómetros), también se puede ver en su informe de calibración en el anexo 2.



Figura 34. Rugosímetro Taylor Hobson. Fuente: Elaboración propia.

Las medidas obtenidas pueden observarse en la tabla 11.

Tabla 11. Medidas reales pieza de poliestireno de alto impacto. Fuente: Elaboración propia.

	REAL	NOMINAL
Diámetro mayor	29,99 ± 0,02 mm	30,00 mm
Diámetro menor	20,01 ± 0,02 mm	20,00 mm
Longitud diámetro mayor	20,18 ± 0,02 mm	20,00 mm
Longitud diámetro menor	15,07 ± 0,02 mm	15,00 mm
Longitud total	35,2 ± 0,02 mm	35,00 mm
Ancho ranura	4,00 ± 0,02 mm	4,00 mm
Profundidad ranura	5,03 ± 0,02 mm	5,00 mm
Distancia ranura – extremo inferior	30,16 ± 0,02 mm	30,00 mm
Rugosidad media	6,10 ± 0,24 μm	

Analizando los valores obtenidos, se comprueba que con este material y los parámetros seleccionados en el software CURA, las medidas tienden a ser más grandes que las ideales.

Para obtener una pieza de dimensiones óptimas con este material, habría que minimizar aproximadamente un 1% en cuanto a longitudes a la hora del diseño 3D. Las demás dimensiones son bastante precisas en relación con el modelo 3D.

Obviamente, no es representativo, por realizar solo una pieza con este material.

Una vez realizada la impresión en 3D, el siguiente paso sería la utilización de la pieza como modelo para la fundición.

4.6 Cambio del material

4.6.1 Problemas encontrados con HIPS

Antes de realizar la fundición, se prendió una pequeña porción del filamento del poliestireno de alto impacto. Al realizarlo, se observó que solo con prender un pequeño tramo, tanto el olor como los humos que se expulsaban eran excesivos para lo que se esperaba de un material similar al poliestireno común, y también excesivos en relación con lo encontrado en su ficha técnica. [10]

Además, en el aire quedaban pequeñas partículas quemadas, no se deshacían por completo, se formaba una nube con pequeñas partículas suspendidas en el ambiente.

Por lo tanto, como medida de seguridad y prevención frente a la realización de la fundición, se procedió a la búsqueda de otro material para continuar con el proyecto.

4.6.2 Nueva elección de material

Es necesario recordar que la idea del trabajo partía de evitar materiales como el PLA o ABS por sus problemas a la hora de la fundición, desafortunadamente, el HIPS no consiguió mejorar este apartado. Por lo tanto, la idea que surgió se fundamenta en el mismo proceso de fundición a la cera perdida.

Al realizar el proceso convencional de fundición con cera, se procedió a buscar un material con las características de esta, pero que pudiera ser extruido como

filamento para nuestra impresora 3D, ya que la cera normal no se puede utilizar como filamento por sus características.

4.6.2.1 Filamento de MoldLay

Después de valorar varias opciones, el filamento elegido fue el MoldLay (Figura 35), probando en primera instancia el diámetro de filamento de 2,85 mm.



Figura 35. Bobina de Moldlay de 2,85mm de diámetro. Fuente: Elaboración propia.

Este filamento fue creado por el desarrollador alemán Kai Parthy de Lay-Filaments. La finalidad del desarrollo de este filamento es imprimir moldes/modelos tanto para la fundición a la cera perdida como para el moldeado permanente.

Son varias las mejoras que introduce respecto al PLA:

- El horno necesario para ser quemado requiere una temperatura más baja que los plásticos convencionales utilizados para impresión 3D, el quemado de este filamento puede realizarse incluso en un horno casero.
- Al realizarse el quemado, abandona fácilmente el molde por sus cavidades, no se queda pegado ni quedan restos, ya que adopta una viscosidad similar a la del aceite.

- No emite humos tóxicos al quemarse ni genera residuos. [20]

Al intentar realizar la impresión de nuestro modelo creado en 3D con este filamento, su gran fragilidad no le permitía completar la curvatura que debe recorrer en la impresora bcn3d sin romperse, por lo que tuvo que ser descartado.

En consecuencia, se consiguió una bobina de 1,75 mm (Figura 36) de este material para intentar obtener modelos satisfactoriamente en la impresora Artillery Sidewinter x2, ya que la extrusión directa podría suplir en cierta medida las limitaciones en cuanto a fragilidad.



Figura 36. Bobina de MoldLay diámetro 1,75mm. Fuente: Elaboración propia.

Al realizar las pruebas con esta bobina, se vio que no era necesario tener una impresora con extrusión directa, ya que, en este formato de 1,75 mm, el MoldLay no tiene fragilidad, se puede doblar con facilidad sin romper.

A raíz de esto, se crearon tres piezas, dos cilindros de tamaño más pequeño y uno de un tamaño igual al realizado con el HIPS (Figura 37).

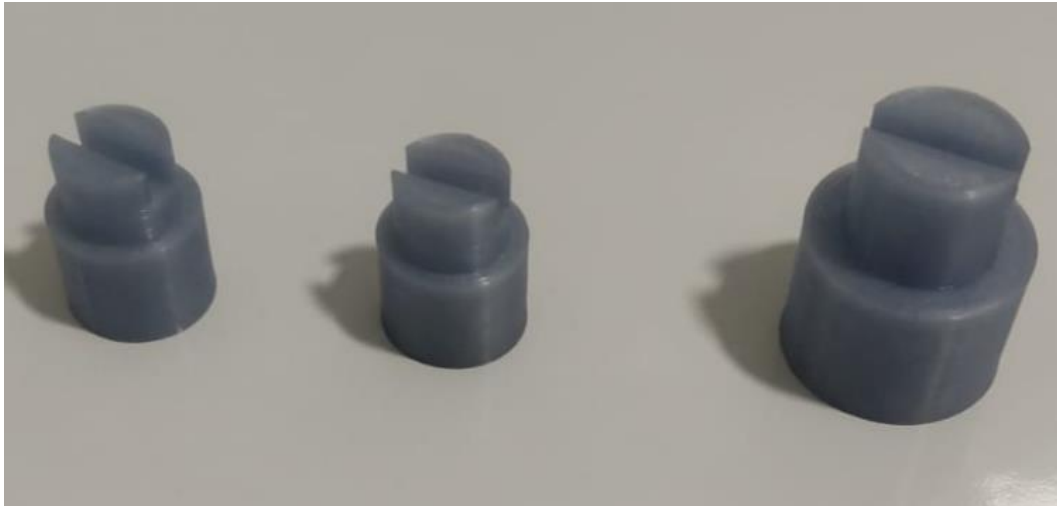


Figura 37. Cilindros realizados con MoldLay. Fuente: Elaboración propia.

Uno de los cilindros pequeños (lo llamaremos PIEZA 1, fue impreso con una velocidad de 45 mm/s, mientras que el otro, PIEZA 2, fue impreso con una velocidad de 60 mm/s, para ver si aparecía alguna diferencia destacable en la impresión).

Las tres piezas se imprimieron a la misma temperatura de impresión (175 °C) y la misma temperatura de cama (55 °C).

Tras su impresión, al igual que con el HIPS, se procede a medir sus dimensiones y rugosidad (Figura 38), para poder ver el comportamiento del material al ser impreso, dichas dimensiones se pueden ver en la tabla 12 y tabla 13.

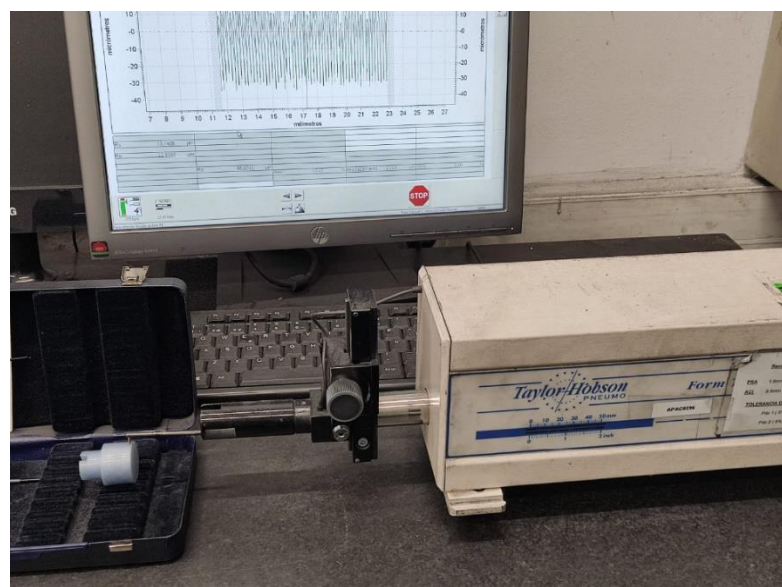


Figura 38. Medición de la rugosidad media de los cilindros. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Medidas cilindro grande MoldLay Fuente: Elaboración propia.

	REAL	NOMINAL
Diámetro mayor	29,40 ± 0,02 mm	30,00 mm
Diámetro menor	19,75 ± 0,02 mm	20,00 mm
Longitud diámetro mayor	20,20 ± 0,02 mm	20,00 mm
Longitud diámetro menor	14,95 ± 0,02 mm	15,00 mm
Longitud total	35,15 ± 0,02 mm	35,00 mm
Ancho ranura	3,91 ± 0,02 mm	4,00 mm
Profundidad ranura	5,02 ± 0,02 mm	5,00 mm
Distancia ranura - extremo inferior	30,15 ± 0,02 mm	30,00 mm
Rugosidad media	13,14 ± 0,24 μm	-

Tabla 13. Medidas realizadas en cilindros pequeños de MoldLay. Fuente: Elaboración propia

	PIEZA 1-REAL	PIEZA 2-REAL	NOMINAL
Diámetro mayor	19,65 ± 0,02 mm	19,60 ± 0,02 mm	20,00 mm
Diámetro menor	14,90 ± 0,02 mm	14,85 ± 0,02 mm	15,00 mm
Longitud diámetro mayor	15,13 ± 0,02 mm	15,02 ± 0,02 mm	15,00 mm
Longitud diámetro menor	9,85 ± 0,02 mm	9,95 ± 0,02 mm	10,00 mm
Longitud total	25,12 ± 0,02 mm	25,1 ± 0,02 mm	25,00 mm
Ancho ranura	3,92 ± 0,02 mm	3,95 ± 0,02 mm	4,00 mm
Profundidad ranura	5,02 ± 0,02 mm	5,04 ± 0,02 mm	5,00 mm
Distancia ranura - extremo inferior	20,10 ± 0,02 mm	20,04 ± 0,02 mm	20,00 mm
Rugosidad media	14,17 ± 0,24 μm	14,37 ± 0,24 μm	-

En cuanto a los ajustes en el modelo 3D con este material, en el diámetro mayor deberíamos aumentar de un 3,6 a un 4% el valor real para obtener el

valor esperado, para el diámetro menor el valor debe ser aproximadamente de un 2%. Para las longitudes habría que minimizar su valor aproximadamente un 1,5%, excepto para la longitud del diámetro menor, que se mantiene por debajo de su valor real en un 0,7% de media. El ancho de ranura también debería ser sobredimensionado aproximadamente en un 4%, mientras que su profundidad debería minimizarse un 1,2%.

En lo referente a los dos cilindros pequeños, el realizado a una velocidad menor tiene un valor algo menor de rugosidad media (14,17 frente a 14,37 μm), pero no se valora como representativo al no ser las dos mediciones exactamente iguales, mientras que las dimensiones también son dispersas, por lo que no se aprecia una mejora evidente por realizar una impresión más lenta.

De forma paralela, se buscó otro filamento para intentar suplir el problema de la fragilidad del MoldLay en su versión de 2,85 mm, ya que no se sabía si el filamento de 1,75 mm iba a dar unas mejores prestaciones. Por ello, se buscó otro material distinto, el **Polycast**.

4.6.2.2 Filamento Polycast

Polycast es un filamento de impresión 3D novedoso diseñado específicamente para aplicaciones de fundición a la cera perdida.

Sus principales ventajas son las siguientes:

- Ofrece una calidad superficial superior, a la vez que minimiza la necesidad de postprocesado.
- Su quemado, al igual que el MoldLay, no deja residuos, lo que permite obtener piezas metálicas sin prácticamente defectos.
- Al estar en formato de filamento, implica un menor coste en relación con las otras formas de impresión 3D (SLA, SLS).[21]

El formato de filamento elegido fue el de 1,75mm de diámetro, por lo que su impresión se realizará con la impresora Creatily Ender 3 Pro del taller de fabricación.

Las dos primeras pruebas con este filamento (Figuras 39 y 40) no fueron satisfactorias, a mitad de la impresión se empezaba a despegar la pieza de la placa de la impresora, ya que su base no era completamente plana, por lo que

no se completaba la impresión. Ni si quiera una base a mayores (Figura 40) fue suficiente para que la impresión se completase.



Figura 39. Primera prueba con Polycast. Fuente: Elaboración propia



Figura 40. Segunda prueba con Polycast. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente prueba, se realizó la impresión sin cama caliente, pero tampoco se obtuvo un resultado satisfactorio, la pieza seguía despegándose de la base.

Como solución, se modificaron varios parámetros. La primera capa se incrementó hasta los 2 mm de altura para que el modelo tuviera suficiente asiento y no se despegase. A su vez, la temperatura de trabajo se subió hasta los 215 °C y la temperatura de la cama a 70 °C.

Tras ello, se obtuvieron dos modelos completos (Figura 41).



Figura 41. Cilindros de material Polycast. Fuente: Elaboración propia.

Tras su impresión y, al igual que con los otros dos materiales, se procedió a medir sus dimensiones y su rugosidad, obteniendo los valores de la tabla 14.

Tabla 14. Dimensiones y rugosidad cilindros de Polycast. Fuente: Elaboración propia.

	CILINDRO 1-REAL	CILINDRO 2-REAL	NOMINAL
Diámetro mayor	29,85 ± 0,02 mm	29,90 ± 0,02 mm	30,00 mm
Diámetro menor	20,00 ± 0,02 mm	20,00 ± 0,02 mm	20,00 mm
Longitud diámetro mayor	20,3 ± 0,02 mm	20,3 ± 0,02 mm	20,00 mm
Longitud diámetro menor	15,02 ± 0,02 mm	15,00 ± 0,02 mm	15,00 mm
Longitud total	35,30 ± 0,02 mm	35,30 ± 0,02 mm	35,00 mm
Ancho ranura	3,85 ± 0,02 mm	3,85 ± 0,02 mm	4,00 mm
Profundidad ranura	5,07 ± 0,02 mm	5,05 ± 0,02 mm	5,00 mm
Distancia ranura – extremo inferior	30,40 ± 0,02 mm	30,43 ± 0,02 mm	30,00 mm
Rugosidad media	12,41 ± 0,24 μm	13,78 ± 0,24 μm	-

Analizando los resultados, podemos ver que ambas piezas son prácticamente idénticas. Al igual que con el MoldLay, las longitudes tienden a ser algo mayores de las nominales, teniendo que ser minimizadas en un 3,5% aproximadamente excepto la longitud del diámetro menor. Para los diámetros, el menor está justo en su medida, mientras que el mayor debería ser sobredimensionado un 1%. Para la ranura, habría que sobredimensionar su ancho un 8%, y minimizar su profundidad un 2%.

Comparando los tres materiales utilizados, el valor más destacable es la pequeña rugosidad que obtenemos con el HIPS (6,1 μm) en relación con los otros dos materiales.

Al estar todas las piezas medidas, el último paso es realizar la fundición para obtener los modelos en el material metálico que sea elegido.



CAPÍTULO 5. FUNDICIÓN DE LOS MODELOS

5.1 Introducción

En este apartado se va a realizar la fundición de tres cilindros de igual tamaño con materiales distintos. El primero de ellos será el cilindro de poliestireno de alto impacto, que será fundido en un molde de arena por colada directa, evitando tener que realizar su quemado en el método a la cera perdida por la alta generación de humos y partículas que se explicó anteriormente.

El segundo cilindro será uno de los dos realizados con Polycast. El tercero, por su parte, será el cilindro de mayor tamaño creado con MoldLay. En ambos se utilizará el proceso de la cera perdida, por lo que serán quemados antes de verter el metal dentro del cilindro de fundición.

5.1 Material utilizado

El material utilizado para ambos procesos será el latón.

El latón es una aleación de cobre y zinc que puede tener proporciones variadas para crear latones con diferentes propiedades. El único requisito para los latones industriales es que tenga menos de un 50% de cobre.

El latón ha sido utilizado como metal de fundición desde épocas prehistóricas, antes incluso de que el zinc fuera descubierto. Se producía por la mezcla de cobre con calamina, una fuente natural de zinc.

La densidad de este material ronda entre los 8,4 g/cm³ y 8,7 g/cm³, mientras que su punto de fusión ronda los 900 y los 940 °C dependiendo de su composición.[22]

Para facilitar los cálculos de metal fundido necesario en cada proceso, se redondea la densidad a 9 g/cm³. Por lo tanto, a partir de los volúmenes de los cilindros, de los bebederos y troncos de cera utilizados en los procesos, que ascendían a 33 cm³ aproximadamente, en cada uno de los tres procesos se utilizan $9 \text{ g/cm}^3 * 33 \text{ cm}^3 = 300 \text{ g}$ de latón.

5.2 Método de fusión del material

Para la fusión del latón se va a utilizar un soplete alimentado por acetileno, ya que con este gas se alcanzan temperaturas de hasta 1200 °C, ideal para superar el punto de fusión de nuestro material.

La fusión del latón se realizará en un pequeño crisol dentro de un habitáculo refractario capaz de soportar estas altas temperaturas (Figura 42).



Figura 42. Fusión del latón con acetileno. Fuente: Elaboración propia.

5.3 Equipo y materiales específicos de cada proceso

5.3.1 Colada directa en molde de arena

- **Arenas utilizadas:** Las arenas utilizadas para el molde se denominan arenas Petrobond (Figura 43). Estas arenas tienen una granulometría controlada, están libres de impurezas, no tienen agua, y se aglutinan con una proporción mínima de aceites. Son muy fáciles de moldear, logrando una gran resistencia, dimensionalidad y reproductividad del modelo.[23]
- **Cajas utilizadas:** En este proceso serán utilizadas dos semi cajas rectangulares, cuyas medidas exteriores son 150 x 100 x 40 mm, mientras que las interiores son 142,5 x 92.5 x 40 mm (Figura 43).



Figura 43. Semi cajas y arenas. Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Proceso a la cera perdida

- **Horno utilizado para el quemado:** Horno del taller de la universidad equipado con el programa HC 400 de Conatec (Figura 44), diseñado para su uso en hornos eléctricos, de gas o gasoil, que requieren procesos con distintos niveles de temperatura.[24]



Figura 44. Horno del taller de la universidad. Fuente: Elaboración propia.

- **Cilindros de fundición:** Se utilizarán dos cilindros iguales (uno para cada material) de diámetro interno 66 mm (Figura 45).



Figura 45. Cilindro utilizado para la fundición. Fuente: Elaboración propia

- **Útil para los cilindros:** Útil fabricado por el técnico del taller de la universidad, con el fin de acoplar los cilindros en él para mejorar el vertido del metal fundido y para poder realizar vacío en ambos cilindros (Figura 46).



Figura 46. Útil para cilindros de fundición. Fuente: Elaboración propia.

- **Máquina de vacío:** Fabricada por el técnico del taller de la universidad. Utilizada para realizar el vacío en el útil de los cilindros, con el fin de facilitar el llenado del metal fundido y evitar la aparición de burbujas de aire e inclusión de gases, que empeorarían el proceso de fundición (Figura 47).



Figura 47. Máquina de vacío. Fuente: Elaboración propia.

- **Revestimiento utilizado:** El nombre del revestimiento utilizado es Plasticast (Figura 48). Este revestimiento de microfusión es especial para piezas prototipadas ya sea en ceras, plástico o resinas. Estos materiales sufren una gran expansión al calentarlos en el horno para su quemado, por lo que este revestimiento está preparado para soportar estas sobre dimensiones. Admite temperaturas de hasta 760 °C, es idóneo para su uso con métodos de fundición manuales, centrífugas o máquinas de vacío y se elimina fácilmente con agua.[25]



Figura 48. Revestimiento Plasticast. Fuente: Elaboración propia.

5.4 Procesos de fundición

5.4.1 Colada directa en molde de arena

La primera fundición realizada será la del poliestireno de alto impacto. Como se ha comentado anteriormente, se tomó la decisión de no realizar con este material el proceso de la cera perdida por los riesgos que podrían aparecer en el quemado del material. En consecuencia, el proceso utilizado fue la colada directa en molde de arena.

El proceso consiste en compactar la arena de una de las dos semi cajas alrededor del modelo de poliestireno de alto impacto. En la otra semi caja, se realiza un agujero a modo de bebedero y se procede a verter el metal fundido directamente por ese agujero.

Una vez fundido el latón en el crisol (Figura 42), se realiza el vertido en el bebedero de la semi caja superior. El resultado se puede observar en la Figura 49.



Figura 49. Colada directa con poliestireno de alto impacto. Fuente: Elaboración propia.

Al separar las dos semi cajas, se observa que el metal fundido, al llegar al poliestireno de alto impacto, no ha conseguido penetrar correctamente, ya que este material ha actuado a modo de tapón. Por ello, el resultado obtenido no ha sido el esperado, y se concluye que no es viable utilizar este material para el diseño de modelos de fundición.

En la Figura 50 se observa la pieza todavía dentro de la semi caja, apreciándose el incorrecto llenado, mientras que en la Figura 51 se puede observar el resultado final, el bebedero completamente lleno de metal fundido y la pieza parcialmente quemada.



Figura 50. Modelo de poliestireno de alto impacto en la semi caja tras la fundición. Fuente: Elaboración propia.



Figura 51. Bebedero y modelo de poliestireno de alto impacto. Fuente: Elaboración propia.

5.4.2 Proceso a la cera perdida

En este proceso de fundición, ambos materiales seguirán el mismo proceso, por lo que será explicado de una manera global.

El primer paso es preparar el cilindro de fundición completo, por lo tanto, se empieza por adherir un tronco de cera central de 7 mm a la base de goma del cilindro de fundición. Posteriormente, se pega nuestro modelo al tronco central (Figura 52).

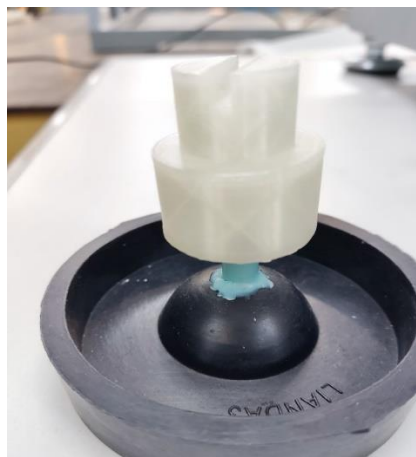


Figura 52. Cilindro adherido al tronco central de cera. Fuente: Elaboración propia.

Tras este paso, el cilindro se acopla a la base (es importante que tengan las mismas medidas para su correcto acople) y se coloca papel a modo de recubrimiento y de embudo para facilitar el llenado del revestimiento (Figura 53).

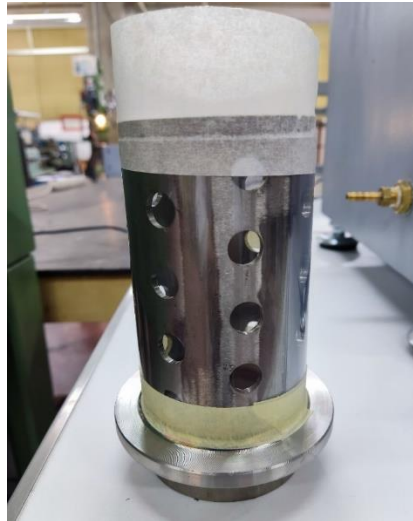


Figura 53. Preparación del cilindro de fundición. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se rellena totalmente el cilindro de revestimiento (Figura 54). Una vez que haya secado, se retira la base de goma para que el cilindro de cera y los modelos puedan ser expulsados en el quemado.



Figura 54. Cilindro de fundición completo con revestimiento. Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso es introducir los cilindros en el horno para obtener la cavidad que será llenada por el metal fundido. En nuestro caso, el horno alcanzó temperaturas de hasta 660 °C (Figura 55).



Figura 55. Horno del taller de fabricación realizando el quemado de los modelos. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado el quemado de los modelos, se extrae el cilindro del horno con unas tenazas para evitar quemaduras (Figura 56), se coloca en el útil fabricado para un correcto llenado y realizar vacío y se procede a verter el latón fundido (Figura 57).



Figura 56. Extracción del cilindro de fundición. Fuente: Elaboración propia.



Figura 57. Latón ya vertido en el útil para cilindros, tras la realización del vacío. Fuente: Elaboración propia.

El último paso consiste en la eliminación del revestimiento tras el enfriamiento del latón fundido. Este paso es tan sencillo como sumergir el cilindro en un bidón de agua (Figura 58), ya que, como hemos comentado anteriormente, el revestimiento está preparado para disolverse en ese medio.



Figura 58. Bidón de agua con el cilindro de fundición sumergido. Fuente: Elaboración propia.

Tras la eliminación del revestimiento, se obtienen los modelos de latón fundido. El primer modelo (Figura 59) obtenido es el correspondiente al MoldLay, mientras que el segundo (Figura 60) se corresponde al Polycast.



Figura 59. Cilindro fundido de Moldlay.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 60. Cilindro fundido de Polycast. Fuente:
Elaboración propia.

En el modelo de Moldlay se realizó el vacío de una forma correcta, ya que tanto el modelo como el cilindro de cera y la mazarota se han reproducido al completo, mientras que en el modelo de Polycast el latón fundido quedó inicialmente obstruido hasta que consiguió llenar el fondo del molde, pero no consiguió llenar la parte restante.

A simple vista se observa un peor acabado superficial en el cilindro de Moldlay en relación con el de Polycast. Este hecho será demostrado a continuación.

5.5 Resultados obtenidos

El último paso del trabajo de fin de grado es la medición de los modelos de latón, para contrastar todas las medidas desde su diseño en 3D hasta su fundición, estas medidas se pueden ver en la tabla 15.

Las mediciones se han realizado de nuevo con un calibre digital 0-150 mm de la Figura 33 y con el programa de medición de rugosidades Taylor Hobson (Figura 34).

Tabla 15. Dimensiones finales de los modelos. Fuente: Elaboración propia.

	Cilindro MoldLay fundido	Cilindro MoldLay impreso	Cilindro Polycast fundido	Cilindro Polycast impreso	Nominal
Diámetro mayor	29,00 ± 0,02 mm	29,85 ± 0,02 mm	29,40 ± 0,02 mm	29,90 ± 0,02 mm	30,00 mm
Diámetro menor	19,37 ± 0,02 mm	20,00 ± 0,02 mm	19,60 ± 0,02 mm	20,00 ± 0,02 mm	20,00 mm
Longitud diámetro mayor	18,95- 19,95 ± 0,02 mm	20,30 ± 0,02 mm	19,10- 19,70 ± 0,02 mm	20,30 ± 0,02 mm	20,00 mm
Longitud diámetro menor	14,85 ± 0,02 mm	15,02 ± 0,02 mm	14,96 ± 0,02 mm	15,00 ± 0,02 mm	15,00 mm
Longitud total	34,00-34,50 ± 0,02 mm	35,30 ± 0,02 mm	34,50-34,70 ± 0,02 mm	35,30 ± 0,02 mm	35,00 mm
Ancho ranura	3,90 ± 0,02 mm	3,85 ± 0,02 mm	3,80 ± 0,02 mm	3,85 ± 0,02 mm	4,00 mm
Profundidad ranura	5,10 ± 0,02 mm	5,07 ± 0,02 mm	5,07 ± 0,02 mm	5,05 ± 0,02 mm	5,00 mm
Distancia ranura - extremo inferior	29,00-29,60 ± 0,02 mm	30,40 ± 0,02 mm	29,30-29,60 ± 0,02 mm	30,43 ± 0,02 mm	30,00 mm
Rugosidad media	17,28 ± 0,24 μm	12,41 ± 0,24 μm	5,79 ± 0,24 μm	13,78 ± 0,24 μm	-

Estudiando las dimensiones, se ve demasiada variabilidad al medir una misma dimensión, lo que no es apto para el objetivo que queremos conseguir en este trabajo. En las tablas 16 y 17 se realiza un estudio de la contracción obtenida en todo el proceso para ambos materiales, intentando encontrar un patrón que corregir en el proceso.

Tabla 16. Proceso completo con MoldLay. Fuente: Elaboración propia.

	Nominal	Cilindro MoldLay impreso	Contracción 3D- Impresión	Cilindro MoldLay fundido	Contracción Impresión- Fundición	Contracción 3D-Fundición
Diámetro mayor	30,00 mm	29,85 ± 0,02 mm	-0,5 %	29,00 ± 0,02 mm	-2,85 %	-3,33 %
Diámetro menor	20,00 mm	20,00 ± 0,02 mm	0 %	19,37 ± 0,02 mm	-3,15 %	-3,15 %
Longitud diámetro mayor	20,00 mm	20,30 ± 0,02 mm	+1,5 %	18,95-19,95 ± 0,02 mm	-(6,65-1,72 %)	-(5,75-0,25 %)
Longitud diámetro menor	15,00 mm	15,02 ± 0,02 mm	+0,13 %	14,85 ± 0,02 mm	-1,13 %	-1 %
Longitud total	35,00 mm	35,30 ± 0,02 mm	+0,86 %	34,00-34,50 ± 0,02 mm	-(3,68-2,27 %)	-(2,86-1,43 %)
Ancho ranura	4,00 mm	3,85 ± 0,02 mm	-3,75 %	3,90 ± 0,02 mm	+1,3 %	-2,5 %
Profundidad ranura	5,00 mm	5,07 ± 0,02 mm	+1,4 %	5,10 ± 0,02 mm	+0,59 %	+2 %
Distancia ranura – extremo inferior	30,00 mm	30,40 ± 0,02 mm	+1,33 %	29,00-29,60 ± 0,02 mm	-(4,61-2,63 %)	-(3,33-1,33 %)
Rugosidad media	-	12,41 ± 0,24 μm	-	17,28 ± 0,24 μm	+39,24 %	-

Analizando estos valores con el material MoldLay, si se observa el proceso completo, las medidas tienden a sufrir una contracción de un 3 % de media, excepto la profundidad de la ranura, en la que su medida se ha visto aumentada un 2%.

Tabla 17. Proceso completo con Polycast. Fuente: Elaboración propia.

	Nominal	Cilindro Polycast impreso	Contracción 3D- Impresión	Cilindro Polycast fundido	Contracción Impresión- Fundición	Contracción 3D-Fundición
Diámetro mayor	30,00 mm	29,90 ± 0,02 mm	-0,33 %	29,40 ± 0,02 mm	-1,67 %	-2 %
Diámetro menor	20,00 mm	20,00 ± 0,02 mm	0 %	19,60 ± 0,02 mm	-2 %	-2 %
Longitud diámetro mayor	20,00 mm	20,30 ± 0,02 mm	+1,5 %	19,10-19,70 ± 0,02 mm	-(5,91-2,96 %)	-(4,5-1,5 %)
Longitud diámetro menor	15,00 mm	15,00 ± 0,02 mm	0 %	14,96 ± 0,02 mm	-0,27 %	-0,27 %
Longitud total	35,00 mm	35,30 ± 0,02 mm	+0,86 %	34,50-34,70 ± 0,02 mm	-(2,27-1,7 %)	-(1,43-0,86 %)
Ancho ranura	4,00 mm	3,85 ± 0,02 mm	-3,75 %	3,80 ± 0,02 mm	-1,3 %	-5 %
Profundidad ranura	5,00 mm	5,05 ± 0,02 mm	+1 %	5,07 ± 0,02 mm	+0,4 %	+1,4 %
Distancia ranura - extremo inferior	30,00 mm	30,43 ± 0,02 mm	+1,43 %	29,30-29,60 ± 0,02 mm	-(3,71-2,73 %)	-(2,33-1,33 %)
Rugosidad media	-	13,78 ± 0,24 μm	-	5,79 ± 0,24 μm	-57,98 %	-

En la tabla 17 se observa que, con el Polycast, la contracción es un poco menor (alrededor del 2%) excepto en el ancho de la ranura, en el cual el valor asciende hasta el 5 %. Al igual que con MoldLay, la profundidad de la ranura es el único valor en el que ha habido sobredimensionamiento, pero en un valor menor que el obtenido con MoldLay, siendo este valor 1,4 %.

En ambos modelos fundidos existen zonas con gran variación de medida, cabe destacar la longitud del diámetro superior, ya que para el MoldLay hay una diferencia de medidas de hasta 1 mm, mientras que para el Polycast esta diferencia alcanza los 0,6 mm.



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Se ha conseguido realizar una evaluación detallada de los tres materiales utilizados para cada proceso. Un material estándar utilizado en impresión 3D, como es el poliestireno de alto impacto, no ha conseguido ofrecer un modelo fundido, incluso con un proceso más convencional y sencillo como la colada directa en molde de arena. Como solución a estos problemas, se crearon materiales como los que hemos utilizado, el MoldLay y el Polycast, diseñados específicamente para el tipo de metodología que queríamos seguir, siendo capaces de otorgar dos modelos completos de metal fundido. Por lo tanto, es aconsejable realizar una buena búsqueda de información según el proceso que queramos utilizar antes de elegir un material.

Se ha conseguido obtener una reproducción de detalles prácticamente idéntica al modelo diseñado en 3D al realizar las dos fundiciones, obteniendo también unos resultados óptimos en cuanto a las rugosidades finales. Por su parte, no se han podido controlar las dimensiones de las piezas, ya que al realizar solo un proceso completo con cada material no se pueden controlar elementos como la contracción y otros defectos asociados.

Se ha evaluado el desempeño de un proceso como el de la cera perdida utilizando modelos de impresión 3D con resultados satisfactorios, al haber sido el proceso que nos ha otorgado modelos fundidos completos.

En cuanto a las líneas futuras, en fundiciones industriales normalmente se utiliza una máquina de vacío, mientras que en fundiciones más “caseras” es un elemento no tan fácil de obtener y generalmente no se utiliza. Como hemos podido observar al realizar la fundición, si no se genera el vacío antes de verter el metal fundido el llenado puede no ser correcto, por lo que es altamente recomendable su realización.

Continuando con la fundición, se deberían hacer más pruebas para controlar los defectos encontrados, ya que al realizar la medición de las dimensiones se observa que son muy variables. En algunas longitudes podemos encontrar diferencias de incluso 1 mm en función del punto en el que midamos, error no admisible si se espera sustituir los procesos convencionales con este método.

También es interesante probar distintos materiales de metal fundido y de impresión 3D, evaluando con cada uno de ellos dimensiones, rugosidades y uniformidad en las medidas.

Por último, es recomendable realizar un sobredimensionamiento por la contracción obtenida, aunque siempre es aconsejable realizar en primera instancia un proceso completo con cada modelo, para observar la contracción real que puede sufrir cada material utilizado en función de los utensilios de los que dispongamos, ya que las tablas de contracciones están estandarizadas y podrían no servir para nuestra práctica.



CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA



- [1]. LLC CP. Desarrollo de la Fundición | Historia de la Metalurgia [Internet]. Storyboard That. [citado 15 de abril de 2023]. Disponible en: <https://www.storyboardthat.com/es/innovations/fundici%C3%B3n>
- [2]. Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid. Manufactura, ingeniería y tecnología. 5ª. Pearson educación; 2002.
- [3]. Aceros Fundidos | PDF | Tratamiento a base de calor | Acero [Internet]. Scribd. [citado 3 de junio de 2023]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/407071220/Aceros-fundidos>
- [4]. D.M. Stefanescu. Volume 15 Casting. 1988.
- [5]. Jorge Alsina Benavente. LA FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA (Microfusión). 2004.
- [6]. Fundición a la cera perdida (procesos de joyería artesanales) [Internet]. 2021 [citado 11 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://candelaenrama.com/procesos-de-joyeria-fundicion-a-la-cera-perdida/>
- [7]. Philip R. Beeley. Foundry Technology. 1972.
- [8]. C. W. Hirt, B. D. Nichols, and N.C. Romero. SOLA-A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows. 1975.
- [9]. Shape the world we live in | CATIA – Dassault Systèmes (3ds.com) - Buscar con Google [Internet]. [citado 12 de abril de 2023]. Disponible en: [https://www.google.com/search?q=Shape+the+world+we+live+in+%7C+CATIA+%E2%80%93+Dassault+Syst%C3%A8mes+\(3ds.com\)&oq=Shape+the+world+we+live+in+%7C+CATIA+%E2%80%93+Dassault+Syst%C3%A8mes+\(3ds.com\)&aqs=chrome.69i59j9j9&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=Shape+the+world+we+live+in+%7C+CATIA+%E2%80%93+Dassault+Syst%C3%A8mes+(3ds.com)&oq=Shape+the+world+we+live+in+%7C+CATIA+%E2%80%93+Dassault+Syst%C3%A8mes+(3ds.com)&aqs=chrome.69i59j9j9&sourceid=chrome&ie=UTF-8)
- [10]. Impresión 3D [Internet]. Dassault Systèmes. 2022 [citado 12 de abril de 2023]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/3d-printing>
- [11]. Guía completa: impresión 3D FDM o modelado por deposición fundida, ¡te explicamos todo! - 3Dnatives [Internet]. [citado 9 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>
- [12]. C L. Guía completa: sinterizado selectivo por láser o SLS, ¡te explicamos todo! [Internet]. 3Dnatives. 2019 [citado 9 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-selectivo-por-laser-les-explicamos-todo/>
- [13]. S S. Guía completa: SLA o impresión 3D por estereolitografía, ¡te explicamos todo! [Internet]. 3Dnatives. 2017 [citado 9 de mayo de 2023].



- Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>
- [14]. Vanessa T.D., Ramón O.P. y Francesc E.C. Fabricación y conformado de poliestireno de alto impacto. 2006.
- [15]. HiPS Premium (Poliestireno) | Filament2Print [Internet]. [citado 4 de mayo de 2023]. Disponible en: https://filament2print.com/es/hips/1146-hips-premium-poliestireno.html#/237-color-negro/217-diametro-175_mm/223-formato-bobina_750_g
- [16]. Major industrial polymers - PVC, Homopolymer, Vinylidene Chloride, and Acrylic Polymers | Britannica [Internet]. [citado 9 de abril de 2023]. Disponible en: <https://www.britannica.com/topic/industrial-polymers-468698/Polyvinyl-chloride-PVC>
- [17]. M A. Las características de Cura, el slicer más extendido en el mercado de la impresión 3D [Internet]. 3Dnatives. 2022 [citado 20 de abril de 2023]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/cura-laminador-para-impresion-3d-250320202/>
- [18]. Tipos de Filamento para Impresora 3D | TAICED [Internet]. [citado 21 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.taiced.com/post/materiales-para-tecnologia-fdm-o-fff>
- [19]. Jorge. BCN3D presenta la Sigma y Sigmax R19: La nueva generación de impresoras 3D [Internet]. BCN3D Technologies. 2018 [citado 8 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://www.bcn3d.com/es/bcn3d-presenta-la-sigma-y-sigmax-r19-la-nueva-generacion-de-impresoras-3d/>
- [20]. MoldLay | Filament2Print [Internet]. [citado 11 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://filament2print.com/es/lay/645-moldlay.html>
- [21]. PolyCast™ [Internet]. [citado 19 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://us.polymaker.com/products/polycast>
- [22]. Coca Rebollero, P. y J. Rosique Jiménez. Ciencia de Materiales Teoría-ensayos- tratamientos. Ediciones Pirámide; 2000.
- [23]. Petrobond (arena oleosa preparada) [Internet]. Berg sl. 2018 [citado 31 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://bergsl.com/petrobond/>
- [24]. HC400. Conatec [Internet]. [citado 1 de junio de 2023]. Disponible en: <https://www.conatec.com/conatec/de/hc400.asp?nombre=2388&cod=2388&sesion=1>
- [25]. Revestimiento Ransom Plasticast, 1 Caja - ComraShop Herramientas Joyería [Internet]. [citado 1 de junio de 2023]. Disponible en: <https://comrashop.es/revestimiento-productos-accesorios/2161-plasticast-ransom-platicast-1-caja.html>





CAPÍTULO 8: ANEXOS

8.1 Fichas técnicas de los materiales de impresión

Ficha técnica poliestireno de alto impacto:

Información general	
Fabricante	Orbitech (Alemania)
Material	HiPS (Poliestireno de alto impacto)
Formato	Bobina de 750g
Densidad	1.04 g/cm ³
Diámetro de filamento	1.75 ó 2.85 mm
Tolerancia de diámetro	±0,1 mm
Longitud filamento	±299 m (Ø 1.75 mm-0.75Kg) ±113 m (Ø 2.85 mm-0.75Kg)
Color	Negro, natural, azul
RAL/Pantone	-
Propiedades de impresión	
Temperatura de impresión	230-235 °C
Temperatura de base/cama	90-110 °C
Temperatura de cámara	No necesaria
Ventilador de capa	No recomendado
Propiedades mecánicas	
Resistencia al impacto Izod	-
Resistencia al impacto Charpy	13 KJ/m ²
Alargamiento a la rotura	20-65 %
Resistencia a la tracción	-
Módulo de tracción	2250 MPa
Resistencia a la flexión	-
Módulo de flexión	2250 MPa
Dureza superficial	Shore 65D
Propiedades térmicas	
Temperatura reblandecimiento	95°C
Temperatura de fusión	-

Ficha técnica MoldLay:

Información general	
Fabricante	Kai Parthy-LayFilaments (Alemania)
Material	MoldLay
Formato	Pack de 50g Rollo de 250g Bobina de 750g
Densidad	-
Diámetro de filamento	1.75 ó 2.85 mm
Tolerancia de diámetro	±0,1 mm
Longitud filamento	-
Color	Gris cera
RAL/Pantone	-
Propiedades de impresión	
Temperatura de impresión	175-180°C
Temperatura de base/cama	<40°C
Temperatura de cámara	No necesaria
Ventilador de capa	Recomendado
Propiedades mecánicas	
Resistencia al impacto Izod	-
Resistencia al impacto Charpy	-
Alargamiento a la rotura	-
Resistencia a la tracción	-
Módulo de tracción	-
Resistencia a la flexión	-
Módulo de flexión	-
Dureza superficial	-
Propiedades térmicas	
Temperatura reblandecimiento	-
Temperatura de fusión	170°C
Propiedades específicas	
Transparencia	Opaco

Ficha técnica Polycast:

Investment Casting with PolyCast™

- MakerGear M3 / M3 independent Dual / M2 / M2 Dual
- BCN3D Sigma / +
- Zortrax M300 / M200
- Raise3D N2 / N2 Plus
- CEL Robox
- MASS PORTAL Pharaoh XD 20 / Pharaoh XD 30 / Pharaoh XD 40
- FLASHFORGE Creator pro / Dreamer
- XYZPrinting da vinci Pro
- 3D Platform

4.2. Slicer settings

Below are recommended slicer settings for printers with standard 0.4 mm nozzles. The parameters can be modified to suit any particular printer set up.

Parameter	Recommended Setting
Nozzle temperature (°C)	200 – 230
Build surface material	Glass, Blue Tape, BuildTak®
Build surface treatment	Not required if heated to 60-70 °C; Or apply PVA glue to the build surface
Build plate temperature (°C)	0 - 70
Model cooling fan	Turned on
Printing speed (mm/s)	40 – 90
Raft separation distance (mm)	0.1 - 0.14
Retraction distance (mm)	1 – 3
Retraction speed (mm/s)	30 – 40
Recommended environmental temperature (°C)	20 – 30
Threshold overhang angle (°)	60
Recommended support materials	S02N (P1), or PVA

Other comments :

- Print patterns with minimal infill (e.g. 10%) and number of shells (2-3). This facilitates the pattern burnout process, and can prevent potential damage to the ceramic shell.
- Apply shrinkage compensation to the STL file. The dimensional change of printed PolyCast™ patterns during the casting process is negligible, so you only need to consider the shrinkage of metal from the molten to solid state. Modify the size of the model by the metal/alloy-dependent compensation factor, which is typically between 1.007-1.030. For example, the compensation factor for steel is 1.025-1.030. Therefore if the expected dimension of the metal part is 1 m, the dimension of printed patterns should be 1.025-1.030 m.

8.2 Fichas de calibración

Ficha calibración calibre 0-150 mm:

CÓDIGO: A-225	Nº SERIE: 22040059	DESCRIPCIÓN: Calibre dig.(0-150 mm)
TEMPERATURA INICIAL: 20,5°C	TEMPERATURA FINAL: 20,5°C	HUMEDAD: 42%
ESTADO DEL EQUIPO: <input checked="" type="checkbox"/> ACEPTABLE	<input type="checkbox"/> NO ACEPTABLE	FECHA: 30/05/2023

DATOS

MEDIDAS DE EXTERIORES(mm)

NOMINAL	MEDIDA				
	1	2	3	4	5
5	4,99	5,00	5,00	5,01	5,00
25	25,01	25,00	24,99	24,99	25,00
75	75,01	75,02	75,01	75,00	75,00
150	150,01	150,00	150,02	150,01	150,02

MEDIDAS DE PROFUNDIDADES(mm)

NOMINAL	MEDIDA				
	1	2	3	4	5
5	5,01	5,00	5,01	4,99	5,01
25	25,01	25,01	25,02	25,02	25,01

MEDIDA DE INTERIORES(mm)

NOMINAL	MEDIDA				
	1	2	3	4	5
60,0010	60,01	60,01	60,00	60,01	60,01
150,0015	150,01	150,02	150,02	150,01	150,02

VALORES DE INCERTIDUMBRE

EXTERIORES

CONTRIBUCIONES INCERTIDUMBRE	$U_{\Delta x}$	U_s	U_z	U_p
MAX.VALOR	6,9276	5,2382	2,8868	2,0048
	$I = 18,7 \mu m$			

PROFUNDIDAD

CONTRIBUCIONES INCERTIDUMBRE	$U_{\Delta x}$	U_s	U_z	U_p
MAX.VALOR	8,0822	5,5998	2,8868	0,3366
	$I = 20,5 \mu m$			

INTERIORES

CONTRIBUCIONES INCERTIDUMBRE	$U_{\Delta x}$	U_s	U_z	U_p
MAX.VALOR	8,3708	3,1301	2,8868	0,5389
	$I = 19,4 \mu m$			

INCERTIDUMBRE FINAL

$I = 20,5 \mu m$ PARA K=2

RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN ACEPTABLE NO ACEPTABLE

CRITERIO DE ACEPTACIÓN: $I(K=2) \leq 0,05mm$



Ficha de calibración Rugosímetro Taylor Hobson:

CÓDIGO	RU-02	Nº SERIE:	0274	DESCRIPCIÓN:	RUGOSÍMETRO-PERFILÓMETRO
TEMPERATURA INICIAL	20,7°C	TEMPERATURA FINAL	20,6°C	HUMEDAD	48%
ESTADO DEL EQUIPO	<input checked="" type="checkbox"/> ACEPTABLE		<input type="checkbox"/> NO ACEPTABLE	FECHA	19/01/2023

DATOS

MEDIDAS

RUGOS. Ra	MEDIDA				
	1	2	3	4	5
2,37	2,292	2,291	2,287	2,302	2,313

PARAM. AR	MEDIDA				
	1	2	3	4	5
139	136,1	136,1	136,1	136,2	135,9

RUGOS. R	MEDIDA				
	1	2	3	4	5
9,23	8,91	8,89	8,89	8,90	8,91

VALORES DE INCERTIDUMBRE

RUSIDAD EN Ra

CONTRIBUCIONES INCERTIDUMBRE	U_{Ax}	U_s	U_p	U_r
MAX. VALOR	0,0424	0,0065	0,0000	0,1150
	$I = 0,245 \mu m$ para $k=2$			

RUSIDAD EN AR

CONTRIBUCIONES INCERTIDUMBRE	U_{Ax}	U_s	U_p	U_r
MAX. VALOR	1,6857	0,0686	0,0289	9,0000
	$I = 18,31 \mu m$ para $k=2$			

RUSIDAD EN R

CONTRIBUCIONES INCERTIDUMBRE	U_{Ax}	U_s	U_p	U_r
MAX. VALOR	0,1905	0,0063	0,0029	0,4350
	$I = 0,95 \mu m$ para $k=2$			

CRITERIO DE RECHAZO: $I(K=2) Ra \leq 0,267 \mu m$; $I(K=2) R \leq 1,34 \mu m$; $I(K=2) AR \leq 60 \mu m$

RESULTADO DE LA CALIBRACIÓN ACEPTABLE NO ACEPTABLE

"La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medida por el factor de cobertura $k=2$ que, para una distribución de t de Student con $\nu=4$ grados de libertad, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente un 95%".